

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkötekniikan osasto

Harri Uotila

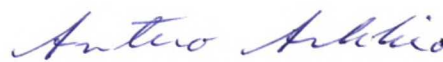
LAIVAN SÄHKÖISEN POTKURIMOOTTORIN JÄÄHDYTYS

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 12.1.96

Työn valvoja


Prof. Tapani Jokinen

Työn ohjaaja


TkT Antero Arkkio

TKK SÄHKÖTEKNIIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO

19883

Tekijä:	Harri Uotila	
Työn nimi:	Laivan sähköisen potkurimoottorin jäähdytys	
Päivämäärä:	8.1.1996	Sivumäärä: 54
Osasto:	Sähkötekniikan osasto	
Professuuri:	S-17 Sähkötekniikka (Sähkömekaniikka)	
Työn valvoja:	Professori Tapani Jokinen	
Työn ohjaaja:	TkT Antero Arkkio	
<p>Tämän työn tavoitteena on selvittää eri jäähdytysmenetelmien soveltuvuus laivan ruoripotkurimoottorina toimivan sähkömoottorin jäähdyttämiseen.</p> <p>Ruoripotkurimoottorit asennetaan laivan ulkopuolelle samalle akselille potkurin kanssa. Koska moottori sijaitsee veden alla, sen runko täytyy tehdä mahdollisimman virtaviivaiseksi. Tämän seurauksena moottorin halkaisijasta tulee pituuteen nähden pieni, mikä aiheuttaa moottorin keskiosan lämpötilojen liiallisen nousun. Tähän ongelmaan tulisi löytää ratkaisu.</p> <p>Työssä on mallinnettu eri jäähdytysmenetelmiä. Nämä mallit on lisätty jo olemassa olevaan lämpöverkko-ohjelmaan. Konvektioon perustuvista jäähdytysratkaisuista on tutkittu eri kaasujen käyttöä jäähdytyksessä, jäähdytyskaasun paineen lisäys ja virtausnopeuden suurentamismahdollisuudet. Muita tutkittuja menetelmiä ovat lämpöputkien käyttö, meriveden johtaminen akselin läpi sekä materiaalien vaihto roottorissa.</p> <p>Lämpenemälaskut on tehty esimerkkikoneena toimivalle 11,4 MW avonapaiselle tahtimoottorille eri jäähdytysmenetelmiä käyttäen. Niiden perusteella voidaan todeta, että parhaiksi keinoiksi lämpenemän alentamiseksi osoittautuivat ilman paineen kasvattaminen sekä meriveden johtaminen onton akseli läpi.</p>		
Avainsanat: jäähdytys, lämpöverkko, sähkömoottori, tahtikone		

Author:	Harri Uotila	
Name of the thesis:	Cooling of electrical ship propulsion motors	
Date:	8.1.1996	Number of pages: 54
Faculty:	Faculty of Electrical Engineering	
Professorship:	S-17 Electrical Engineering (Electromechanics)	
Supervisor:	Professor Tapani Jokinen	
Instructor:	Dr. Antero Arkkio	
<p>Methods for cooling an electric ship propulsion motor are studied. The motor is installed under the ship on the same shaft as the propeller. Because of the hydrodynamic losses in the water, the frame of the motor has to be made as streamlined as possible. The diameter-to-length ratio of the motor becomes very small, and the cooling of the middle parts of the motor becomes difficult.</p> <p>In this work, different cooling methods are modeled. The models are added to an earlier made thermal network program. The following convection based cooling methods are studied: using different gases for cooling, using pressurized cooling gas and increasing the velocity of the gas. The other cooling solutions studied are heat-pipes inside the rotor or shaft, allowing sea water flow through a hollow shaft and changing the coil and core materials in the rotor.</p> <p>The temperature-rise calculations are made for a 11,4 MW salient pole synchronous machine, which has been chosen as an example motor. The best cooling solutions are obtained by using air pressurized to 2 bar for cooling or letting water flow through the hollow shaft.</p>		
Keywords: cooling, thermal network, electric motor, synchronous machine		

ALKULAUSE

Tämä työ on tehty Teknillisen korkeakoulun sähkötekniikan osaston sähkömekaniikan laboratoriossa.

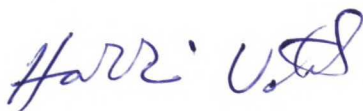
Kiitän työn ohjaajaa TkT Antero Arkkiota saamastani tuesta ja neuvoista, joista on ollut apua tätä työtä tehdessä. Haluan kiittää myös koko laboratorion henkilökuntaa, erityisesti DI Juha Saarta saamistani ideoista ja tuesta sekä Shenghua Xuta avusta ja yhteistyöstä lämpöverkkoa Aplac-ohjelmalle siirrettäessä.

Kiitokset kuuluvat myös työn valvojalle, professori Tapani Jokiselle, mahdollisuudesta työskennellä Sähkömekaniikan laboratoriossa.

Työn teettäjänä on ollut ABB Industry Oy:n konedivisioona. Haluan kiittää Juhani Manteretta, Seppo Kaukosta ja Esa Kolua hyvästä yhteistyöstä, ideoista sekä käyttöni luovutetuista ohjelmista.

Lisäksi kiitän vaimoani Heiniä ja tyttärtäni Annaa ymmärtämyksestä ja kärsivällisyydestä työni aikana.

Espoossa 8.1.1996



Harri Uotila

SISÄLLYSLUETTELO

DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
SYMBOLILUETTELO	7
1 JOHDANTO	9
2 RUORIPOTKURIMOOTTORIN RAKENNE	10
3 MOOTTORIN HÄVIÖLÄHTEET	13
3.1 Rautahäviöt	13
3.2 Virtalämpöhäviöt	14
3.3 Tuuletus- ja hankaushäviöt	15
4 LÄMMÖNSIIRTO	16
4.1 Yleistä	16
4.1.1 Johtuminen	16
4.1.2 Konvektio	17
4.1.3 Säteily	21
4.2 Lämpöverkot	22
4.2.1 Ilmankierron mallinnus lämpöverkossa	23
5 KONVEKTIOON PERUSTUVAT JÄÄHDYTYSRATKAISUT	25
5.1 Virtausnopeuden lisäys	25
5.2 Jäähdytyskaasun vaihto	27
5.3 Jäähdytyskaasun paineen lisäys	31
5.4 Viileämmän ilman johtaminen koneen keskiosaan	33
5.5 Ilman kulkualan pienentäminen ilmapälissä	38
6 MUUT JÄÄHDYTYSRATKAISUT	40
6.1 Meriveden käyttö jäähdytyksessä	40
6.2 Höyrystyslämmön hyväksikäyttö jäähdytyksessä	43
6.1.1 Lämpöputket jäähdytyksessä	44
6.3 Materiaalien valinta	47

7 TULOSTEN TARKASTELU	50
8 YHTEENVETO	52
9 LÄHTEET	53

SYMBOLILUETTELO

A, A_k, A_s	pinta-ala
A_x	kappaleen poikkipinta-ala
a	lämpötilan tasoittumiskerroin
c_p	ilman ominaislämpö
Gr	Grashofin luku
g	putoamiskiihtyvyys
J	virrantiheys
L	lämmitettävän pinnan pituus
l_x	kappaleen pituus
Nu, Nu_x	Nusseltin luku
P_h	häviöteho
$P_{Cu,h}$	virtalämpöhäviöt kuparissa
P_p	hankaushäviöt
Pr	Prandtlin luku
Q	lämpövirta
q	ilman tilavuusvirta
q_k, q_s	lämpövirrantiheys
R_k	konvektiivinen lämpöresistanssi
R_q	ilman lämpöresistanssi
R_s	säteilyn lämpöresistanssi
R_x	kappaleen lämpöresistanssi
Re	Reynoldsin luku
$T_{p,e}$	lämpöputken höyrystymispään pintalämpötila
$T_{p,c}$	lämpöputken jäähdytyspään pintalämpötila
U_{HP}	lämpöputken lämmönsiirtokerroin
V_{Cu}	kuparijohtimen tilavuus
v	ainevirtauksen nopeus
$ \vec{v}_i $	ilman nopeusvektorin itseisarvo
w_k	pinnan muotokerroin
x	jäähdytettävän pinnan karakteristinen mitta
α	säteilyn absorptiokerroin
α_k	konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin
α_0	tasaisen pinnan konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin
α_s	säteilyn lämmönsiirtymiskerroin
α_g	väliaineen ominaisuuksista riippuva osa konvektiivisessa lämmönsiirtymiskertoimessa
β	tilavuuden lämpötilakerroin

δ_0	termisen rajakerroksen paksuus
ε	kahden kappaleen välinen säteilyluku
ε	emissiivisyys
η	dynaaminen viskositeetti
λ, λ_x	lämmönjohtavuus
ν	kinemaattinen viskositeetti
ρ	ilman tiheys
ρ	säteilyn läpäisykerroin
σ	Stefan-Boltzmannin vakio
σ_{Cu}	kuparin sähkönjohtavuus
τ	säteilyn heijastumiskerroin
θ_{Fl}	jäähdytysaineen lämpötila
θ_k	ilman keskimääräinen lämpenemä osa-alueessa
θ_l	ilman loppulämpenemä osa-alueen lopussa
θ_w	jäähdytettävän pinnan lämpötila

1 JOHDANTO

Paremmen nopeussäädön ja pienemmän energiankulutuksen vuoksi on laivoissa käytetty perinteisten dieselkäyttöjen rinnalla sähkökäyttöjä jo usean vuosikymmenen ajan. Laivan käyttömoottorina toimii sähkömoottori, jonka tarvitsema sähkö tuotetaan dieselgeneraattoreilla. 1980-luvun lopulla Kværner Masa-Yards ja ABB alkoivat kehittää uutta potkurimoottoria, jolla saavutettaisiin lisäksi parempi laivan ohjattavuus. Kehitystyön tuloksena saatiin Azipod-ruoripotkurimoottori. Se on taajuudenmuuttajalla syötetty vaihtosähkömoottori, joka on sijoitettu laivan peräosaan vesirajan alapuolelle sukkulan muotoiseen runkoon. Potkuri on sijoitettu samalle akselille moottorin kanssa ja koko moottorin runko kääntyy 360°. Laivan ohjaus toteutetaan kokonaisuudessaan potkurimoottoria kääntämällä eikä peräsintä enää tarvita. Ensimmäinen Azipodyksikkö, jonka moottoriteho oli 1,5 MW, asennettiin huoltoalus Seiliin 1990.

Koska moottori sijoitetaan laivan ulkopuolelle vesirajan alapuolelle, täytyy moottorin rungon olla hyvin virtaviivainen. Sen takia myös sähkömoottori joudutaan suunnittelemaan pitkulaiseksi. Staattorin pituus halkaisijaan nähden kasvaa normaalia suuremmaksi ja roottorin keskiosan lämpötila varsinkin suuritehoisissa moottoreissa nousee liikaa tavanomaisia jäähdytyskeinoja käytettäessä.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää alustavasti eri jäähdytystapojen käyttömahdollisuuksia kyseisessä ruoripotkurimoottorissa sekä pyrkiä löytämään uusia jäähdytyskeinoja käytettäville moottoreille. Aluksi tutkitaan jo valmistuneiden konstruktioiden ongelmakohdat ja pyritään löytämään niihin ratkaisuja. Tämän jälkeen ideoidaan uusia ratkaisuja jäähdytyksen toteuttamiseksi. Saaduista ideoista analysoidaan ja selvitetään soveltuvuusrajat lupaavimmille ideoille. Työssä keskitytään pääosin 1993 valmistuneen Uikun 11,4 MW avonapaisen tahtikoneen Azipod-rakenteeseen esimerkkitapauksena ja sen lämpenemisen tutkimiseen käytetään Esa Kolun vuona 1993 diplomityönä tekemää tahtikoneiden lämpöverkko-ohjelmaa. Työn loppuosassa käytetään myös APLAC- piirisimulaattoriohjelmaa, jolla tutkitaan Kolun lämpöverkkoon tehtävien muutosten vaikutusta koneen lämpenemään.

2 RUORIPOTKURIMOOTTORIN RAKENNE

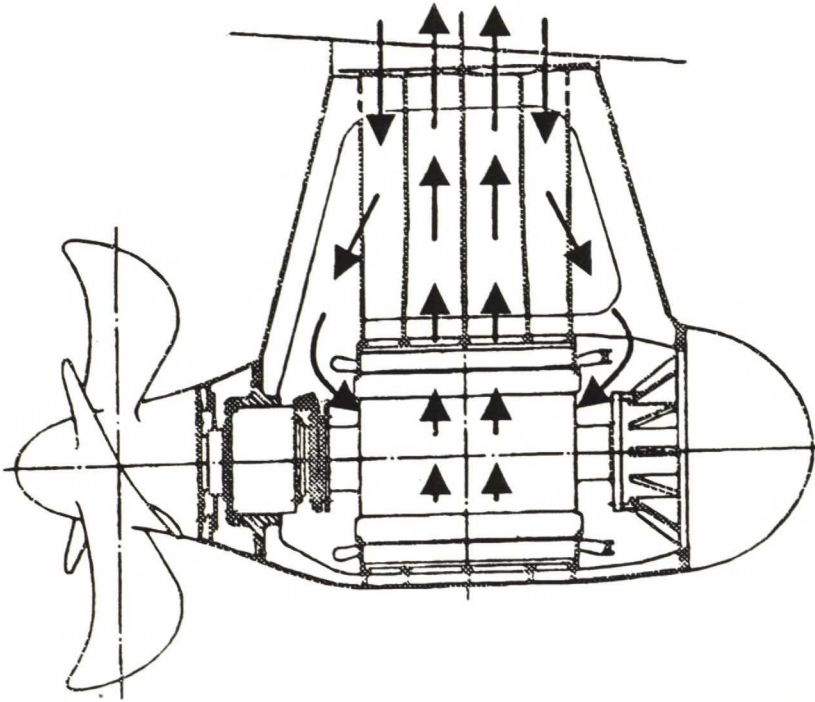
Azipod ruoripotkuriyksikkö sisältää viisi eri järjestelmää: potkurimoottorin, tehon- ja signaalinsiirtojärjestelmän, jäähdytysjärjestelmän, potkuriakselin laakereineen sekä ohjausjärjestelmän.

Potkurimoottori on yleensä avonapainen tahtikone, mutta pienissä aluksissa voidaan käyttää myös oikosulkumoottoreita. Keväällä 1995 toimitettiin Tonavalle jäänmurtaja, jossa on kaksi 560 kW oikosulkumoottorilla toteutettua azipod-yksikköä. Moottorit ovat yleensä 6-12 napaisia, koska niitä käytetään ilman vaihteistoa ja potkurin pyörimisnopeudet vaihtelevat 0:sta 300:aan kierrokseen minuutissa (Uikku 120 1/min). Tahtikoneita syötetään syklokonvertterilla ja epätahtikoneita PWM invertterillä. Niinpä moottoreista saadaan nimellismomentti koko pyörimisnopeusalueella. Potkurimoottorien sijoittamisella kääntyvään moottoritilaan aluksen ulkopuolelle saavutetaan kaksi etua. Toisaalta moottorin sijoittaminen laivan ulkopuolelle lisää hyötykäytössä olevan tilan määrää laivassa tai mahdollistaa laivan lyhentämisen. Toisaalta potkurimoottorin kääntyminen parantaa oleellisesti laivan ohjattavuutta. Ruoripotkurimoottorilla varustetun laivan kääntösäde pienenee jopa neljäsosaan perinteisiin peräsinkäyttöihin verrattuna (Motorship, 1993).

Tehon ja signaalinsiirtojärjestelmän valintaan vaikuttaa suuresti se kuinka paljon potkuriyksikön sallitaan kääntyä. Mikäli kääntökulma on rajattu välille $\pm 200^\circ$, tehon ja signaalin siirtoon voidaan käyttää joustavia kaapeleita. Tällöin tarvitaan kuitenkin erillinen kaapelinsyöttölaite. Jos yksikön sallitaan kääntyä $\pm 360^\circ$, teho täytyy siirtää kiinteän rungon ja pyörivän potkuriyksikön välillä liukurenkaiden välityksellä. Mittaus- ja ohjaussignaalit voidaan välittää optisilla kuiduilla käyttäen optista pyörivää liitosta.

Moottorin jäähdytykseen on tähän mennessä rakennetuissa koneissa käytetty normaalia ilmajäähdytystä. Jäähdytysilman lämpö on siirretty potkuriyksikön kuoren läpi meriveteen tai suuremmissa tahtikoneyksiköissä laivassa sijaitsevassa erillisessä jäähdytyshuoneessa lämmönsiirtimien avulla. Moottorirungon liitososa on jaettu neljään kanavaan, joista kahdessa reunimmaisessa viedään jäähdytysilma alas

moottoritilaan (kuva 2.1). Ilma johdetaan täten molemmista moottorin päistä ilmaväliin jäähdyttämään staattori- ja roottorikäimityksiä. Staattorin levysydämessä on radiaalisia jäähdytyssolia, joita pitkin lämmennyt ilma siirtyy levysydäntä jäähdyttäen sen läpi ns. kuorisolaan, joka on staattorin ja kuoren välissä. Kuorisolasta ilma johdetaan kaulaosan keskimmäisten kanavien kautta takaisin laivan jäähdytyshuoneeseen. Näissä kanavissa on myös tehon ja mittaussignaalien siirtoon tarkoitetut kaapelit.



Kuva 2.1. Tahtikoneella toteutetun ruoripotkurimoottorin rakenne ja jäähdytysilman kierto (Kværner Masa-Yards, 1994).

Potkuriakseli koostuu potkurista, moottorin akselist, akselitiivisteistä sekä laakereista. Potkuri on yleensä neljä- tai viisilapainen ja sen rakenne riippuu alustyyppistä. Laakereista toisen täytyy olla painelaakeri, koska sen täytyy kestää myös aksiaalista työntövoimaa.

Laivan ohjaus tapahtuu potkuriyksikköä kääntämällä pienen perämoottoriveneen tapaan. Tällöin moottorin koko teho saadaan haluttuun suuntaan ja kääntösäde pienenee. Potkuriyksikköä käännetään hydraulimoottoreiden avulla. Potkuriyksikön kääntymisen vuoksi hätäpysäytys ja laivan ajo perä edellä voidaan suorittaa joko

moottorin pyörimissuuntaa muuttamalla tai kääntämällä moottori päinvastaiseen suuntaan laivan kanssa. Jälkimmäinen vaihtoehto on hätäpysäytyksessä parempi, koska potkurin työntövoima ei ole kumpaankin suuntaan pyöriessä yhtä suuri. Täten hätäpysäytyksessä saadaan maksimi työntövoima jarrutukseen potkuriyksikköä kääntämällä.

3 MOOTTORIN HÄVIÖLÄHTEET

Sähkömoottoria käytettäessä syntyy häviöitä, jotka ilmenevät moottorin lämpenemisenä. Jo 8-12 K liiallinen lämpenemä lyhentää koneen eliniän puoleen eristeiden haurastumisen vuoksi (Paloniemi, 1990). Tämän takia sähkökoneissa käytettävät eristeet on jaettu lämpöluokkiin niiden lämpötilakestoisuuden mukaan. Mikäli moottori lämpenee liikaa, täytyy pyrkiä vähentämään moottorin häviöitä tai tehostamaan jäähdytystä. Tässä työssä keskitytään jäähdytyksen tehostamisen tutkimiseen.

3.1 Rautahäviöt

Sähkömoottorin häviöt voidaan jakaa kahteen osaan: kuormituksesta riippumattomiin häviöihin sekä kuormitushäviöihin. Kuormitusvirrasta riippumattomia vakiohäviöitä ovat rautahäviöt, kitkahäviöt sekä tuuletushäviöt. Rautahäviöt koostuvat hystereesihäviöistä sekä pyörrevirtahäviöistä. Magneettikentän muutos sähkömoottorissa aiheuttaa raudan magneettisen tilan muutoksen. Tähän muutokseen tarvitaan energiaa. Koska magneettikentän vaihtelut aiheuttavat yleensä palautumattomia muutoksia raudan magneettiseen tilaan, osa tästä energiasta muuttuu häviöksi. Nämä häviöt ilmenevät staattorin ja roottorin levysydämien lämpenemisenä. Magneettikentän vaihtelu indusoi lisäksi virtoja vuon läpäisemiin johtaviin osiin. Näitä pyörrevirtoja esiintyy staattori- ja roottoriraudassa, staattori- ja roottorijohtimissa, runkorakenteissa ja mahdollisesti myös laakereissa. Koneen rautahäviöihin voidaan vaikuttaa materiaalien valinnalla ja käsittelyllä. Raudan magneettisiin ominaisuuksiin ja siten hystereesihäviöiden suuruuteen vaikuttaa suuresti raudan laatu. Vaihtovirtakoneiden staattorin ja roottorin levysydämet valmistetaan lamelloiduista sähkölevyistä, joilta vaaditaan suurta kyllästysvuontiheyttä, pieniä hystereesihäviöitä sekä suurta alku- ja maksimipermeabiliteettia (Niemenmaa, 1989). Sähkölevyn ominaisuuksiin vaikuttaa suuresti myös sen käsittely valmistuksen aikana. Raudan työstäminen varsinkin tylsillä meisteillä rikkoo raudan raerakenteen, jolloin magneettiset ominaisuudet heikkenevät huomattavasti. Myös levyjen keskinäinen eristys voi rikkoutua, jolloin pyörrevirtoja pääsee syntymään työstökohdissa. Täten rautahäviöitä voidaan vähentää huolellisella käsittelyllä. Levysydämen kautta kulkevia

virtoja syntyy oikosulkukoneissa myös eristämättömiä roottorisauvoja käytettäessä. Osa roottorijohtimien virrasta oikaisee levysydämen kautta vinouraisissa koneissa (Niemenmaa, 1989). Rautahäviöitä suurentaa myös staattorin levysydämen uritus, mikä aiheuttaa permeanssin vaihtelun ilmapälissä. Permeanssin vaihtelun taajuus on verrannollinen staattori- ja roottoriurien määrään. Tämän seurauksena syntyy ns. uraharmonisia yliaaltoja, jotka aiheuttavat pulsaatiohäviöitä hampaissa (Köfler, 1990). Pulsaatiohäviöitä pystytään pienentämään käyttämällä magneettisia urakiiloja. Johtimien pyörrevirtahäviöt kasvavat voimakkaasti johtimien korkeuden kasvaessa. Niinpä suuremmissa koneissa johtimien koon pienentämiseksi käytetään useita rinnakkaisjohtimia.

3.2 Virtalämpöhäviöt

Kuormituksesta riippuvat virtalämpöhäviöt vaikuttavat eniten moottorin lämpenemiseen. Moottorin ottama virta lämmittää käämityksiä sekä staattorissa, että roottorissa. Virtalämpöhäviöt staattorissa ja roottorissa saadaan kaavasta

$$P_{\text{Cu,h}} = \frac{J^2}{\sigma_{\text{Cu}}(T)} \cdot V_{\text{Cu}} \quad (3.01)$$

missä J on virrantiheys

σ_{Cu} on kuparin sähkönjohtavuus

T on kuparin lämpötila

V_{Cu} on kuparin tilavuus

Tahtikoneissa roottorivirran aiheuttamia häviöitä kutsutaan myös magnetoimishäviöiksi, koska roottoria käytetään tahtikoneissa koneen magnetoimiseen. Virran syötössä roottorille hiiliharjojen avulla syntyy myös pieniä sähköisiä häviöitä. Oikosulkumoottoreissa roottorivirta täytyy laskea staattorivirrasta. Virtalämpöhäviöiden lisäksi kuormitusvirta aiheuttaa ns. lisähäviöitä, joiksi lasketaan lisääntyneet rauta- ja pyörrevirtahäviöt staattori- ja roottoriraudassa sekä pyörrevirtahäviöt johtimissa.

3.3 Tuuletus- ja hankaushäviöt

Sähköisten ja magneettisten häviöiden lisäksi moottoria kuormittavat myös tuuletus- ja hankaushäviöt. Moottorin jäähdytyksen takia konetta ympäröivä ilma täytyy saada virtaamaan pitkin koneen pintaa. Tähän tarkoitukseen tarvitaan puhallin, joka voidaan asentaa moottorin omalle akselille, jolloin käytetään itsetuuletusta. Koneen tuuletukseen voidaan käyttää myös vierastuuletusta, jolloin tuuletinta pyörittää erillinen moottori. Vierastuuletuksessa tuuletushäviöt eivät kuormita käyttömoottoria. Vierastuuletusta käytetään etenkin käytöissä, joissa moottorin nopeus on hyvin hidas tai se vaihtelee suurella nopeusalueella. Tässä työssä tutkittavia ruoripotkurimoottoreita käytetään nimellismomentilla nopeusalueella 0 - 300 1/min, joten moottoreiden tuuletus hoidetaan erillisillä puhaltimilla. Moottorin pyöriessä syntyy hankaushäviöitä kitkasta johtuen laakereissa sekä tahtikonekäytöissä hiiliharjoissa. Lisäksi moottorin pyöriessä syntyy hankaushäviöitä ilman kanssa. Edellä mainituilla häviöillä on kaksi vaikutusta koneen lämpenemään. Toisaalta ne lämmittävät hankauskohdassa paikallisesti koneen pintoja (laakerit, hiiliharjat) ja toisaalta ne aiheuttavat moottorille kuormaa, joka lisää koneen ottamaa virtaa ja aiheutta näin kuparihäviöitä. Niinpä tuuletus- ja hankaushäviöt mitataankin koneen ottamasta virrasta erillisen mittausjärjestelyn avulla.

Ruoripotkurimoottorin lämpötilaan vaikuttaa koneen omien häviöiden lisäksi myös jäähdytysjärjestelmän häviöt, jotka vaikuttavat jäähdyttävän ilman lämpötilaan ja siten myös suoraan koneen lämpötilaan. Tahtikonekäyttöisissä ruoripotkurimoottoreissa jäähdyttävä ilma johdetaan ilmakehää pitkin jäähdytyshuoneeseen, missä lämmönvaihtimien avulla ilma jäähdytetään. Jäähdytynyt ilma johdetaan takaisin koneelle ahtaita kanavia pitkin. Kun ilma virtaa ahtaissa kanavissa suurella nopeudella, se lämpenee. Tämän takia moottorille tuleva ilma on jonkin verran lämpimämpää kuin lämmönvaihtimelta lähtevä. Lisäksi ahtaat kanavat aiheuttavat ilmanvirtaukseen painehäviöitä ja siten ilmavirran nopeus alenee, mikä pienentää jäähdytystehokkuutta.

4 LÄMMÖNSIIRTO

4.1 Yleistä

Sähkömoottorin häviöt lämmittävät konetta ympäröivää ilmaa kuumemmaksi. Lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan itsestään, mikä aiheuttaa lämmön siirtymistä moottorista ympäristöön. Taloudellisista syistä koneen nimellisteho massaa kohden täytyisi saada mahdollisimman suureksi. Täten moottorin lämpenemän tarkka tunteminen on muodostunut erittäin tärkeäksi suunnittelun osatekijäksi. Moottorin lämpenemien laskemiseksi koneille on kehitetty lämpöverkkoja, joilla mallinnetaan moottorin lämmönsiirtoa ja lasketaan lämpötiloja eri toimintapisteissä laskettujen tai tunnettujen häviötehojen avulla. Lämpö voi siirtyä koneesta ympäristöön kolmella tavalla: johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä (Jokinen, 1991). Jokaisella lämmönsiirtotavalla on omat ominaispiirteensä ja lakinsa, jotka vaikuttavat lämpöverkon laskemiseen eri osissa konetta.

4.1.1 Johtuminen

Lämpö siirtyy kiinteässä aineessa johtumalla. Myös kaasuissa ja nesteissä lämpö voi siirtyä johtumalla, mikäli ne ovat lähes liikkumattomassa tilassa. Kappaleen lämpöresistanssi R_x saadaan kaavasta

$$R_x = \frac{l_x}{\lambda_x} \int_0^l \frac{dx}{A_x(x)} \quad (4.01)$$

tai, jos kappaleen poikkipinta on vakio x-akselin suunnassa, kaavasta (Jokinen, 1991)

$$R_x = \frac{l_x}{\lambda_x A_x} \quad (4.02)$$

missä l_x on kappaleen pituus x-akselin suunnassa

λ_x on aineen lämmönjohtavuus x-akselin suunnassa

A_x on kappaleen poikkipinta

Sähkökoneissa johtumista esiintyy käämityksissä, eristeissä, staattorin ja roottorin levysydämissä, runkorakenteissa jne. Lämpöresistansseja laskettaessa täytyy epähomogeeniset osat kuten käämitys homogenisoida. Käämityksessä lämpö siirtyy välillä hyvin lämpöä johtavaa kuparia pitkin ja välillä huonommin johtavia eristemateriaaleja pitkin. Tällöin määritellään homogeeninen alue ja sille uusi lämmönjohtavuus, joka vastaa alkuperäistä tilannetta. Tällä tavoin saadaan lämpöverkosta yksinkertaisempi ja laskenta-aika lyhenee. Koska sähkökoneiden kuumin osa on käämitys ja eristeet lämpenemiselle arin kohta, kannattaa homogenisoinnin rajat valita siten, että käämityksen uraeristeet eivät kuulu homogenisoituun alueeseen. Tällöin laskenta antaa hieman todellisuutta suurempia lämpenemiä, mikä on suunnittelun kannalta parempi tilanne (Kolu, 1993). Koska tässä työssä ei ole tarkoituksena muodostaa uutta lämpöverkkomallia tutkittaville koneille vaan käytetään hyväksi jo tehtyä lämpöverkko-ohjelmaa, ei lämpöresistanssien homogenisointia tarkastella enempää vaan viitataan kirjallisuuteen (mm. Jokinen, 1991 ja Kolu, 1993).

4.1.2 Konvektio

Kun kaasu tai neste virtaa pitkin kiinteän aineen pintaa, syntyy pinnan lähelle virtausrajakerros. Tässä rajakerroksessa virtaavan aineen nopeus alenee nollaan pintaa lähestyttäessä. Tämän kerroksen läpi lämpö siirtyy johtumalla, jonka jälkeen ainevirtaus vie lämmön pois. Virtausrajakerroksen lisäksi pinnan lähelle syntyy myös terminen rajakerros, missä virtaavan aineen lämpötila muttuu pinnan lämpötilasta ympäröivän jäähdytysaineen lämpötilaan. Terminen rajakerros voi tapauskohtaisesti olla joko paksumpi tai ohuempi kuin virtausrajakerros. Konvektiivisen lämmönsiirron avulla kappaleesta poistuvan lämpövirran tiheys q_k saadaan kaavasta (Wagner, 1988):

$$q_k = \alpha_k \cdot (\theta_{F1} - \theta_w) \quad (4.03)$$

missä α_k on konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin

θ_{F1} on jäähdytysaineen lämpötila

θ_w on kappaleen lämpötila

Täten konvektiivinen lämmönsiirto on suoraan verrannollinen kappaleen ja ympäristön väliseen lämpötilaeroon. Konvektiivisen lämmönsiirron mallintaminen tarkasti on erittäin vaikeaa, koska lämmönsiirtymiskertoimen α määrittäminen on vaikeaa. Kertoimen suuruuteen vaikuttaa suuresti jäähdyttävän aineen ominaisuudet, jotka vaihtelevat lämpötilan mukaan. Täten lämpenemälaskujen tarkka ratkaiseminen vaatisi konvektion osalta iterointia. Käytännössä jäähdytysaineen lämpötila eri osissa konetta voidaan kuitenkin arvioida laskennan kannalta riittävällä tarkkuudella ja siten iteroinnin tarve pienenee. Suurempi ongelma kertoimen määrittämisessä on kuitenkin jäähdytysaineen (esim. ilma) virtauksen määrittäminen eri osissa konetta. Lämmönsiirtymiskertoimen arvo riippuu ratkaisevasti virtausnopeudesta. Mikäli virtausnopeus on alhainen, kappaleen pinnalle syntyy laminaarinen virtaus, missä jäähdyttävä aine virtaa pitkin kappaleen pintaa. Tällöin rajakerroksen lämpötila kohoaa ja lämmönsiirto heikkenee. Kun virtausnopeus kasvaa riittävästi, siirtyään turbulenttiselle alueelle, mikä on lämmönsiirron kannalta paljon tehokkaampaa. Tällöin ilma virtaa turbulenttisesti kappaleen pinnalla ja lämpöä siirtyy myös pinnasta pois päin eikä vain pintaa pitkin. Virtauksen luonteen, laminaarinen vai turbulentti, määrää yksi lämpö- ja virtaustekniikan tärkeimmistä suureista, jonka nimeksi on annettu Reynoldsin luku (Wagner, 1988):

$$Re = \frac{v \cdot x \cdot \rho}{\eta} \quad (4.04)$$

missä v on ainevirtauksen nopeus

x on kappaleen karakteristinen mitta, joka tasolla on sen osan pituus, jonka ohi jäähdyttävä aine virtaa

ρ on kaasun tiheys

η on jäähdyttävän aineen dynaaminen viskositeetti

Reynoldsin luku on hitausvoimien ja kitkavoimien dimensioton suhde. Se ilmaisee virtaustilan. Levyvirtaukselle on voimassa kriittinen Reynoldsin luku $Re_{l,krit} \approx 3 \cdot 10^5$, jota pienemmillä arvoilla esiintyy laminaarinen virtaus ja suuremmilla arvoilla turbulenttinen virtaus. Putkivirtaukselle vastaava arvo on $Re_{d,krit} \approx 2\,300$ (Wagner, 1988).

Konvektiivinen lämmönsiirtyminen kuvataan lämpöverkoissa konvektiovastuksella R_k

$$R_k = \frac{1}{\alpha_k \cdot A_k} \quad (4.05)$$

missä A_k on konvektioala

Lämmönsiirtymiskertoimen määrittämiseen käytetään dimensiotonta lämmönsiirtymiskerrointa, Nusseltin lukua Nu

$$Nu_x = \alpha_k \cdot \frac{x}{\lambda} \quad (4.06)$$

Koska toisaalta lämmönsiirtymiskerroin voidaan määritellä myös kaavalla (Wagner, 1988):

$$\alpha_k = \frac{\lambda}{\delta_\theta} \quad (4.07)$$

missä λ on jäähdyttävän aineen lämmönjohtumiskerroin

δ_θ on kappaleen pinnalla olevan termisen rajakerroksen paksuus

saadaan Nusseltin luku muotoon

$$Nu_x = \frac{x}{\delta_\theta} \quad (4.08)$$

Nusseltin luku siis yksinkertaisesti ilmoittaa kappaleen karakteristisen mitan suhteen termisen rajakerroksen paksuuteen.

Koska konvektio riippuu erittäin paljon jäähdytysaineen nopeudesta, erotetaan toisistaan vapaa konvektio ja pakotettu konvektio. Vapaassa konvektiossa aineen

virtaus ja sen mukana rajakerros aiheutuu yksinomaan lämpötilaerosta, kun taas pakotetussa konvektiossa jäähdyttävä aine (esim. ilma) pakotetaan liikkeseen esimerkiksi koneen akselille asennettavalla tuulettimella. Nusseltin luku määritellään kummassakin tapauksessa erikseen. Pakotetulle konvektiolle pätee:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (4.09)$$

missä Pr on prandtin luku, joka määritellään:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (4.10)$$

missä ν on kinemaattinen viskositeetti

a on lämpötilan tasoittumiskerroin, joka määritellään:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (4.11)$$

missä c_p on kaasun ominaislämpö

Vapaalle konvektiolle pätee:

$$Nu = f(Re, Gr) \quad (4.12)$$

missä Gr on Grashofin luku, joka määritellään:

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot (\theta_w - \theta_{Fl})}{\nu^2} \quad (4.13)$$

missä g on maan vetovoiman aiheuttama kiihtyvyys

L on lämmitettävän pinnan pituus

β on tilavuuden lämpötilakerroin

$\theta_w - \theta_{Fl}$ on pinnan ja jäähdytysaineen välinen lämpötilaero

Edellä esitettyjä funktioita löytyy useista kirjallisuuslähteistä (mm. Wagner, 1988 ja Wiedemann ym., 1967). Esitetyt funktiot eroavat jonkin verran toisistaan, mikä osoittaa konvektiivisen lämmönsiirron mallintamisen vaikeuden. Lisäksi funktion muotoon vaikuttaa jonkin verran virtausnopeus ja sitä kautta Reynoldsin luvun arvo.

4.1.3 Säteily

Lämpösäteily eli terminen säteily on energian siirtymistä sähkömagneettisten aaltojen välityksellä aallonpituusalueella $0,8 - 400 \mu\text{m}$ (Wagner, 1988). Kappaleeseen osuva säteily jakautuu heijastuvaan, läpäisevään ja imeytyvään osaan:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (4.14)$$

missä ρ on heijastunut osa

α on absorboitunut eli imeytynyt osa

τ on läpi mennyt osa tulevasta säteilystä.

Kappaleen lämpötila vaikuttaa siihen kuinka paljon lämpösäteilyä se lähettää. Suurimman mahdollisen säteilymäärän lähettää ns. musta kappale. Emissiivisyys ε ilmaisee säteilyn määrän suhteessa saman lämpöiseen mustaan kappaleeseen. Säteilyn lämpöresistanssi on muotoa

$$R_s = \frac{1}{\alpha_s \cdot A_s} \quad (4.15)$$

missä α_s on säteilyn lämmönsiirtymiskerroin

A_s on kappaleen säteilevä pinta-ala

Lämmönsiirtymiskerroin määritellään (Jokinen, 1991):

$$\alpha_s = \frac{q_s}{\theta_1 - \theta_2} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{\theta_1^4 - \theta_2^4}{\theta_1 - \theta_2} \quad (4.16)$$

missä q_s on säteilevän lämpövirran tiheys

ε on pintojen välinen suhteellinen säteilyluku

θ_1 on kappaleen 1 lämpötila

θ_2 on kappaleen 2 lämpötila

σ on Stefan-Boltzmannin vakio $5,76 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Sähkömoottorin lämpötilat pysyvät yleensä alle 200°C . Täten lämmönsiirtymiskerroin, joka riippuu lämpötilasta, jää aina melko pieneksi. Niinpä säteilyllä ei ole suurta vaikutusta sähkömoottorin jäähdytyksessä ja sen vaikutus voidaan jättää huomioon ottamatta lämpenemälaskuja tehtäessä. Syntyvä virhe on pieni ja se nostaa laskettuja lämpötiloja hieman, mikä on suunnittelun kannalta parempi tilanne.

4.2 Lämpöverkot

Sähkömoottorin lämpövirtauksia ja siten lämpenemiä tutkittaessa voidaan käyttää hyväksi lämpövirtauksen analogisuutta sähkövirtauksen kanssa, mikä on esitetty seuraavassa taulukossa 4.1 (Jokinen, 1991).

Taulukko 4.1. Lämpövirtauksen ja sähkövirtauksen analogia.

Lämpövirtaus	yksikkö	Sähkövirtaus	yksikkö
Lämpövirta P	W	Sähkövirta I	A
Lämpövirran tiheys q	W/m ²	Sähkövirran tiheys J	A/m ²
Lämpötila T	K	Sähköpotentiaali V	V
Lämpötilaero θ	K	Jännite U	V
Lämmönjohtavuus λ	W/mK	Sähkönjohtavuus γ	1/ Ωm
Lämpöresistanssi R	K/W	Sähköresistanssi R	Ω

Lämpenemien laskemiseksi voidaan siten muodostaa sähköisten vastusverkkojen kaltaisia verkkoja lämpövastuksista ja lisätä koneen tuottama häviölämpö verkkoon lämpövirtalähteenä. Koneen lämpenemät saadaan ratkaisemalla verkon eri

solmupisteiden lämpötilaerot normaalilla piirianalyysillä. Tässä työssä ei tarkemmin paneuduta lämpöverkon muodostamiseen vaan käytetään valmista verkkoa hyväksi (Kolu, 1993).

Lämpöverkkojen käyttökelpoisuus perustuu siihen, että lämpöverkkomalli voidaan määritellä puhtaasti koneen mittojen, fysikaalisten vakioiden ja lämmönsiirtokäyrästäjien avulla. Ainoa parametri, joka esimerkiksi täysin suljetuissa epätahtikoneissa täytyy mitata, on konvektiivinen vastus rungosta ilmaan (Mellor ym., 1991). Kokemuksen avulla tämäkin vastus voidaan riittävällä tarkkudella arvioida, joten lämpöverkkomalli voidaan muodostaa suoraan sähköisten mitoitus tietojen perusteella. Lisäksi mallin vaatima laskentakapasiteetti ja siten laitteistovaatimus on melko pieni. Kuitenkin niillä saadut tulokset ovat tarpeeksi tarkkoja koneiden suunnittelun kannalta. Tulosten virheet aiheutuvat pitkälti siitä, että määrättyjen lämpövastusten (konvektio vastukset) tarkka mallintaminen on melko vaikeaa ja että osa häviöistä, varsinkin lisähäviöt, on melko vaikea paikallistaa johonkin tiettyyn osaan konetta. Tulosten tarkkuus paranisi myös jonkin verran mikäli kaikkia yksinkertaistuksia (kuten säteilyn ja aineominaisuuksien lämpötilariippuvuuden huomioimattomuus) ei tehtäisi. Tarkkuuden lisääminen vaatii myös verkon tihentämistä. Nämä seikat kuitenkin lisäävät laskenta-aikaa ja saatava tarkkuuden lisäys on kuitenkin vähäistä.

4.2.1 Ilmankierron mallinnus lämpöverkossa

Koska moottorin pintojen ilmalle luovuttama lämpöenergia riippuu pinnan ja ilman välisestä lämpötilaerosta, täytyy koneen lämpövirtauksien ja ilman lämpenemisen välille muodostaa yhtälöt, jotta koneen lämpöverkko voitaisiin ratkaista. Jäähdyttävän ilman lämpötila nousee sen virratessa pitkin konetta. Osan tästä lämpeämisestä aiheuttaa hankaushäviöt, mutta suurin osa aiheutuu pintojen luovuttamasta lämpöenergiasta. Kun ilma virtaa tietyn koneen osan ohi, se lämpenee hankaushäviöiden P_p ja pinnan luovuttamien häviöiden P_h vaikutuksesta määrän

$$\Delta\theta = \frac{P_p + P_h}{\rho \cdot c_p \cdot q} \quad (4.17)$$

missä c_p on ilman ominaislämpö

q on ilman tilavuusvirta

ρ on ilman tiheys

Koska $\Delta\theta$ on käytännössä melko pieni, voidaan lämpötilan olettaa muuttuvan tutkittavassa osassa lineaarisesti (Jokinen, 1991). Mikäli lämpöverkko on hyvin tiheä, pitää tämä oletus käytännössäkin paikkansa. Harvemmillakaan verkoilla aiheutuva virhe ei ole merkityksellinen. Tällöin virtaavan ilman keskimääräiseksi lämpenemäksi saadaan

$$\theta_k = \frac{\Delta\theta}{2} = \frac{P_\rho + P_h}{2 \cdot \rho \cdot c_p \cdot q} = R_q \cdot (P_\rho + P_h) \quad (4.18)$$

$$R_q = \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot c_p \cdot q} \quad (4.19)$$

jos ilman alkulämpenemä on nolla. Ilman loppulämpenemäksi tutkittavan pinnan kohdalla saadaan

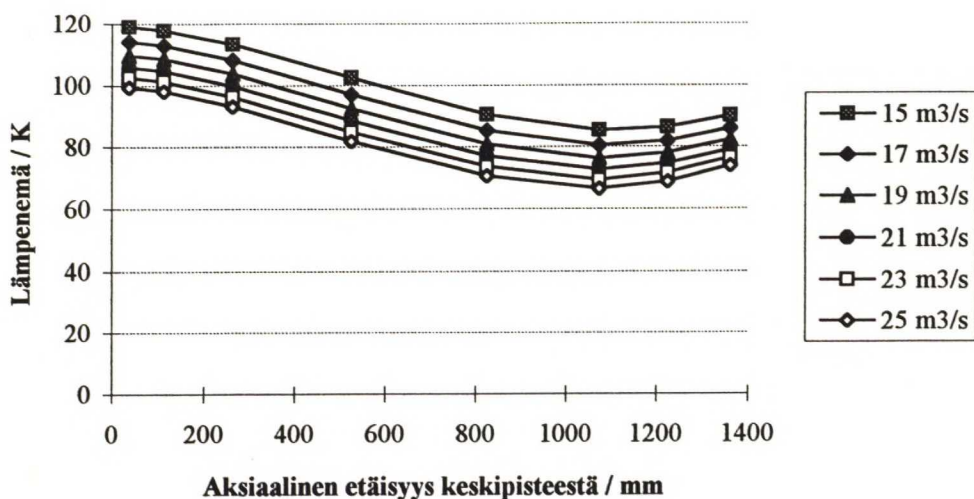
$$\theta_l = 2 \cdot R_q \cdot (P_\rho + P_h) \quad (4.20)$$

5 KONVEKTIOON PERUSTUVAT JÄÄHDYTYSRATKAISUT

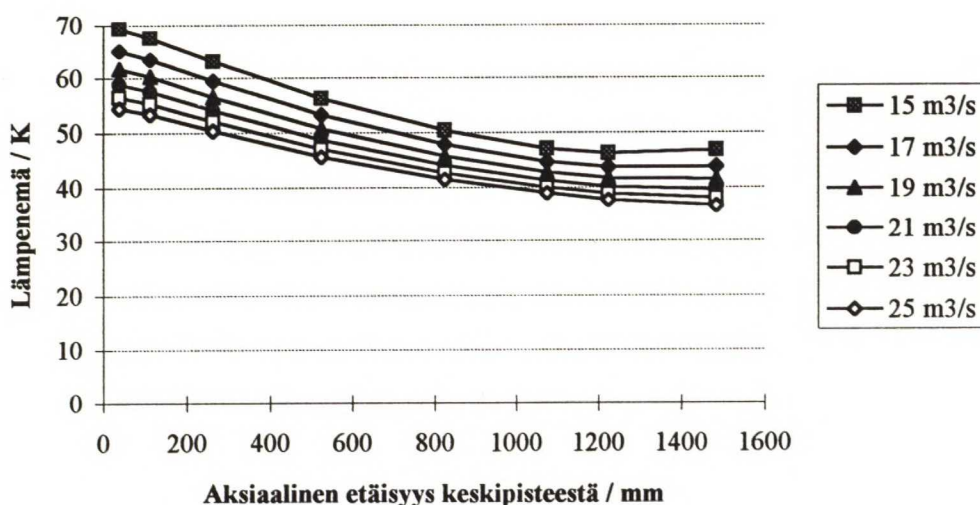
Kuten luvussa 2 todettiin, nykyisten Azipod-yksikköjen moottorien jäähdytys on perustunut normaaliin ilmalla toteutettuun konvektiiviseen jäähdytykseen. Jäähdytysilma on viilennetty joko kääntyvän rungon kautta tai erillisessä jäähdytyshuoneessa lämmönvaihtimien välityksellä ympäröivään meriveteen. Moottorikokoja suurennettaessa konvektiivista jäähdytystä täytyy kuitenkin pystyä nykyisestään parantamaan.

5.1 Virtausnopeuden lisäys

Luvussa 4.1.2 esitettyjen yhtälöiden mukaan konvektiivisen jäähdytyksen tehokkuus riippuu suuresti jäähdytysaineen virtausnopeudesta, mikä lisäksi määrittelee virtauksen luonteen. Virtauksen turbulenttisuutta pystytään lisäämään alhaisemmilla nopeuksilla pinnan karheutta lisäämällä. Karheuden vaikutuksien tutkimista ei tässä työssä tehdä olettaen ne vähäpätöisiksi koko systeemin kannalta ja että virtausnopeus pidetään niin korkeana, että laminaariselle alueelle ei jouduta. Koska moottorien pituudesta johtuen roottorin keskiosa lämpenee liikaa, voidaan tutkia mahdollisuuksia parantaa keskiosan jäähdytyskykyä ilman nopeutta keskiosassa lisäämällä. Uikku-tankkerissa toteutetussa käytössä oli moottoritilaan puhallettavan ilman tilavuusvirtaus $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Kuvassa 5.1 on esitetty moottorin kannalta pahimman paikan eli roottorikuparin lämpenemä roottorin keskipisteen ja päädyn välillä. Roottorikuparin kuumin paikka on keskellä konetta napavarren alaosassa, joten kuvaajan lämpenemät ovat roottorikäämin alaosasta. Kuvaajan lämpenemäarvot on laskettu valmiilla lämpöverkko-ohjelmalla (Kolu, 1993). Vastaavat lämpenemäkäyrät on laskettu myös staattorin käämityksen lämpenemälle (kuva 5.2).



Kuva 5.1. Roottorikäämin alaosan lämpenemäjakautuma ilman tilavuusvirtauksilla 15 - 25 m³/s. X-akselin arvo ilmoittaa aksiaalisen etäisyyden koneen keskipisteestä.



Kuva 5.2. Staattorikäämin ilmarälin puoleisen osan lämpenemäjakautuma ilman tilavuusvirtauksilla 15 - 25 m³/s. X-akselin arvo ilmoittaa aksiaalisen etäisyyden koneen keskipisteestä.

Kuten lämpenemäkäyristä hyvin huomataan, tilanne staattoripuolella on jo nykyisellä puhalluksella (15 m³/s) riittävän hyvä lämpenemän ollessa maksimissaan vain n. 70 K. Roottoripuolella maksimilämpenmä sen sijaan on selvästi korkeampi, jopa n. 120 K. Niinpä jatkossa keskitytään yksinomaan roottorilämpenemien tutkimiseen. Kun tilavuusvirtaus nostetaan 15 m³/s:stä 25 m³/s:een roottorikäämin maksimilämpenmä putoaa 119 K:stä 99 K:iin. Tämä lämpötilanpudotus on jo merkittävä, mutta vaadittava ilmamäärä koneelle on kuitenkin melko suuri ja sen aikaansaaminen voi olla

hankalaa ja kallista ellei peräti mahdotonta, koska kaulaosa tulisi saada nykyistä kapeammaksi. Koska tilavuusvirtaus täytyy olla vähintään 23 m³/s ennen kuin saadaan merkittäviä lämpenemän alenemisia, voidaan todeta, että puhallettavan ilmamäärän lisäys yksistään ei ratkaise annettua ongelmaa. Moottorille menevän ilmamäärän tulee kuitenkin aina olla niin suuri kuin se tapauskohtaisesti on mahdollista, mikä tulee ottaa huomioon kaulaosan kanavia suunniteltaessa.

5.2 Jäähdytyskaasun vaihto

Nopeuden lisäksi konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin riippuu tietenkin jäähdyttävän aineen ominaisuuksista. Toistaiseksi kaikki Azipod-yksiköt on toteutettu ilmajäähdytteisinä moottoreina. Ilmaa on aina saatavissa eikä se vaadi mitään erikoislaitteita. Lisäksi ilman käytössä ei ole mitään riskitekijöitä: se ei ole myrkyllistä eikä räjähdysaltista. Jäähdytysominaisuuksiltaan ilma ei kuitenkaan ole paras mahdollinen vaihtoehto. Tosin ei hirveän huonokaan. Koska roottorikämmityksessä on käytetty jäähdytyksen parantamiseksi hyväksi rivoitusta, on käytettävässä tietokoneohjelmassa konvektiivista lämmönsiirtymiskerrointa α_k laskettaessa käytetty seuraavaa kaavaa (Kolu, 1993):

$$\alpha_k = w_k \cdot \alpha_0 \quad (5.01)$$

missä w_k on pinnan muodosta riippuva kerroin

α_0 on täysin tasaisen pinnan konvektiokerroin

Tasaisen pinnan konvektiokerroin voidaan laskea Nusseltin luvun avulla ja kirjallisuudessa on useita kaavoja, joita sähkökoneille käytetään.

$$\alpha_0 = 7,8 \cdot |\vec{v}_i|^{0,78} \quad (\text{Wiedemann ym., 1967}) \quad (5.02)$$

$$\alpha_0 = 7,7 \cdot |\vec{v}_i|^{0,8} \quad (\text{Schuisky, 1957}) \quad (5.03)$$

$$\alpha_0 = 6,2 + 4,2 \cdot |\vec{v}_i| \quad (\text{Wiedemann ym., 1967}) \quad (5.04)$$

Työssään Esa Kolu on kuitenkin käyttänyt omaa funktiota, joka on osoittautunut mittauksissa melko hyväksi käytetyissä tahtikoneissa jäähdytysaineen ollessa ilma. Kyseinen funktio on muotoa (Kolu, 1993)

$$\alpha_0 = 7,1 \cdot |\vec{v}_i|^{0,78} + 6,0 \quad (5.05)$$

Edellä esitetyissä kaavoissa $|\vec{v}_i|$ on ilman nopeusvektorin itseisarvo koneen ilmapälissä. Kun ohjelmalla aletaan tutkia eri kaasujen vaikutuksia koneen lämpenemiin, ei kaavaa (5.05) voida enää käyttää, koska se pätee vain ilmalle. Niinpä kaasujen vaihdon tutkimista varten on valittu kaava (5.03), joka auki kirjoitettuna saa muodon

$$\alpha_0 = 0,51 \cdot \frac{\lambda}{\nu^{0,32} \alpha^{0,48}} \cdot |\vec{v}_i|^{0,8} \quad (5.06)$$

missä λ on väliaineen lämmönjohtavuus

α on väliaineen lämpötilan tasoittumiskerroin

ν on väliaineen kinemaattinen viskositeetti

Kaava (5.06) voidaan kirjoittaa muotoon

$$\alpha_0 = 0,51 \cdot \alpha_g \cdot |\vec{v}_i|^{0,8} \quad (5.07)$$

missä α_g on väliaineesta riippuva osa kaavassa (5.06)

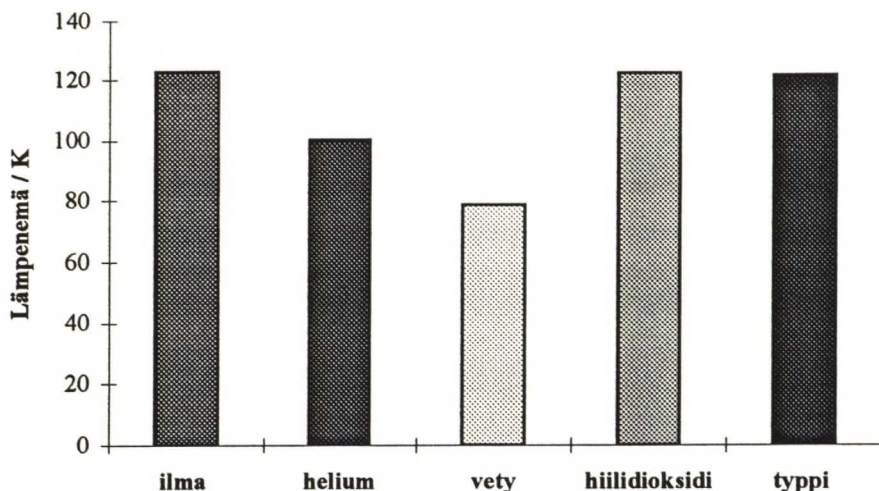
Seuraavaan taulukkoon on kerätty eri kaasujen ominaisuuksia jäähdytyksen kannalta.

Taulukko 5.2. Jäähdytyskaasujen aineominaisuuksia, $p = 1,013 \text{ bar}$, $t = 0 \text{ °C}$
(Wagner, 1988)

väliaine	λ	$\eta (10^{-6})$	ρ	$\nu = \eta/\rho (10^{-6})$	$a (10^{-6})$	α_g
ilma	0,024	17,2	1,29	13,33	18,5	162,94
helium (He)	0,143	19,0	0,18	105,60	153,0	181,62
vety (H ₂)	0,171	8,4	0,09	93,33	136,0	239,05
neon (Ne)	0,046	30,0	0,90	33,33	50,0	144,53
typpi (N ₂)	0,024	16,6	1,25	13,28	18,5	163,13
ammoniakki (NH ₃)	0,022	9,3	0,77	12,08	14,0	176,21
argon (Ar)	0,018	21,0	1,78	11,80	19,2	124,82
kloori (Cl ₂)	0,008	12,3	3,17	3,88	5,4	145,58
hiilimonoksidi (CO)	0,023	16,6	1,25	13,28	17,7	159,69
hiilidioksidi (CO ₂)	0,015	13,7	1,96	6,99	9,3	174,18
typpioksidi (NO)	0,024	18,0	1,34	13,43	18,4	162,97
rikkidioksidi (SO ₂)	0,009	12,0	2,86	4,20	5,0	165,69
vesihöyry (H ₂ O)	0,025	12,0	0,60	20,00	20,6	141,56

Vaikka taulukon 5.2 arvot ovat lämpötilassa $t = 0 \text{ °C}$ ja sähkömoottorin ilmavälin lämpötila vaihtelee välillä $30 - 60 \text{ °C}$, voidaan eri kaasuja vertailla keskenään taulukon tuloksien perusteella, koska erot lämmönsiirtymiskertoimien välillä lämpötilassa 0 °C ja 100 °C ovat melko pieniä.

Saatujen arvojen perusteella on lämpöverkon avulla laskettu lämpenemäarvot niille kaasuille, joiden lämmönsiirtymiskerroin on vähintään yhtä hyvä kuin ilmalla (kuva 5.3). Laskennassa on oletettu jäähdytysaineen tilavuusvirtauksen ($15 \text{ m}^3/\text{s}$) ja sisään menevän kaasun lämpötilan pysyvän vakiona. Lisäksi hankaushäviöiden muuttuminen eri kaasuilla on otettu huomioon. Hankaushäviöt on laskettu ilman hankaushäviöistä suoraan verrannollisina aineen tiheyteen ($P_p \sim \rho$).



Kuva 5.3. Roottorin maksimilämpenemä eri jäähdytyskaasuilla normaalissa ilmanpaineessa. Tilavuusvirtaus ($15 \text{ m}^3/\text{s}$) ja kaasun lämpötila sisäänmenossa on oletettu vakioiksi. Hankaushäviöt oletettu suoraan verrannollisiksi tiheyteen ($P_p \sim \rho$).

Hiilidioksidi ja typpi ovat jäähdytyskaasuina täysin tasavertaisia ilman kanssa, eikä niiden käyttämisellä saada roottoria käymään viileämpänä. Helium ja vety sen sijaan ovat selvästi ilmaa parempia vaihtoehtoja. Heliumia käytettäessä lämpenemät putoavat n. 17 % ja vetyä käytettäessä jopa n. 30 %. Heliumilla ja vedyllä on lisäksi muutamia etuja ilmaan nähden, joita ei ole laskelmissa otettu huomioon. Näiden kaasujen tiheys on huomattavasti alhaisempi kuin ilmalla, joten samalla tuuletinteholla eli samalla massavirtauksella saavutetaan selvästi suurempi tilavuusvirtaus kuin ilmalla. Tai mikäli halutaan sama tilavuusvirtaus, vaadittava tuuletinteho pienenee huomattavasti. Lisäksi samalla lämmönvaihtimella helium ja vety jäähtyvät paremmin kuin ilma. Täten koneelle menevä jäähdytysaineen lämpötila saadaan jonkin verran alhaisemmaksi kuin ilmalla. Nämä seikat lisäävät edellä saatuja lämpenemäeroja heliumin ja vedyn hyväksi.

Mikäli väliaineena käytetään muuta kaasua kuin ilmaa, tarvitaan tietenkin lisävarusteita varsinkin jäähdytyshuoneeseen. Huoneen tulee ensinnäkin olla kaasutiivis, jotta jäähdytyskaasu ei pääsisi leviämään muualle. Lisäksi huoneen ja moottoritilan kaasu täytyy vaihtaa ilmaan aina kun huoneessa tai moottoritilassa käydään. Täten tarvitaan laitteet kaasun vaihtoa varten. Lisäksi vetyä käytettäessä täytyy ottaa huomioon, että vedyn ja ilman seos on erittäin räjähdysherkkä. Niinpä käyttökelpoiseksi kaasuksi jää lähinnä helium.

5.3 Jäähdytyskaasun paineen lisäys

Kun kaavaan (5.06) sijoitetaan seuraavat yhtälöt

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (5.08)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (5.09)$$

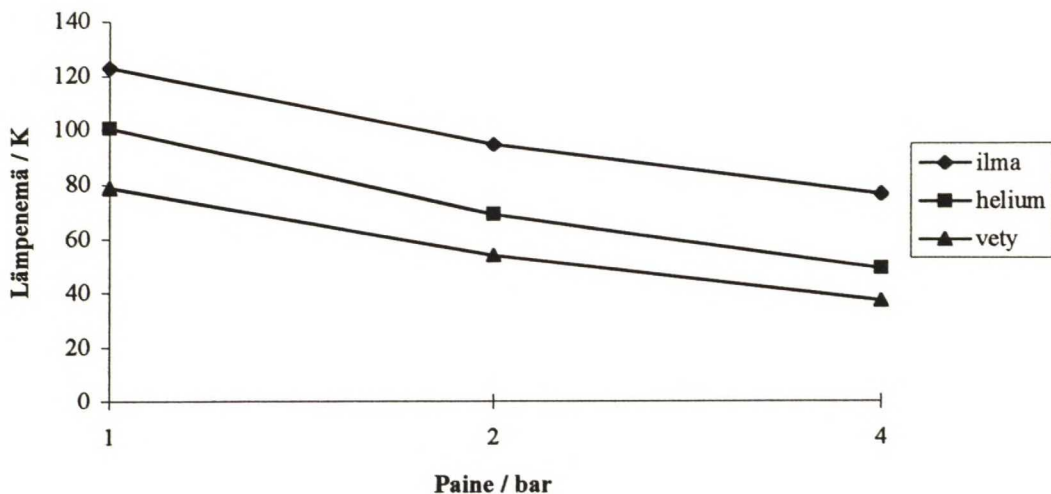
saadaan

$$\alpha_0 = 0,51 \cdot \frac{\lambda^{0,52} \cdot \rho^{0,8} \cdot c_p^{0,48}}{\eta^{0,32}} \cdot |\vec{v}_i|^{0,8} \quad (5.10)$$

missä c_p on aineen ominaislämpö

η on dynaaminen viskositeetti

Koska λ , η ja c_p eivät juurikaan riipu paineesta ja tiheys on suoraan verrannollinen paineeseen ($\rho \sim p$), on konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin verrannollinen tiheyden potenssiin 0,8 ($\alpha_0 \sim \rho^{0,8}$). Paineen vaikutusta roottorin läpenemään on tarkasteltu vain ilmalle, heliumille ja vedylle, koska typelle ja hiilidioksidille saataisiin suurin piirtein samat lämpenemäarvot kuin ilmallekin. Tuloksia laskettaessa on huomioitu hankaushäviöiden kasvu suoraan verrannollisena tiheyteen (kuva 5.4). Tilavuusvirtaus ja sisään menevän kaasun lämpötila on pidetty samoissa arvoissa kuin normaalissa ilmanpaineessa toteutetussa ilmajäähdytyksessä.



Kuva 5.4. Roottorin maksimilämpenemät ilmaa, heliumia ja vetyä jäähdytyskaasuna käytettäessä 1, 2 ja 4 barin paineissa. Tilavuusvirtaus ja kaasun sisäänmenolämpötila on jokaisessa tapauksessa pidetty samana.

Paineen nostaminen kaksinkertaiseksi parantaa ilman jäähdytysominaisuuksia niin paljon, että sillä saavutetaan sama lämpenemätaso kuin heliumilla normaalipaineessa. Kaksinkertainen paine ei vielä aiheuta kovin suuria rasituksia rakenteisiin ja itse moottoritulassa paine-ero rungon yli pienenee, koska meriveden aiheuttama paine-ero rungon yli on normaalitilanteessa noin 1 bar. Kun paine tästä vielä kaksinkertaistetaan 4 bariin, saavutetaan jo sama taso kuin vedyllä normaalipaineessa. 4 barin paine on kuitenkin jo melko suuri ja sen saavuttaminen ja ylläpitäminen vaativat jo parempia laitteita ja tukevampia rakenteita. Heliumilla ja vedyllä paineen vaikutukset ovat samaa suuruusluokkaa kuin ilmallakin ja niillä päästään 2 ja 4 barin paineissa jo erittäin alhaisiin roottorin lämpötiloihin.

Käytännön toteutuksen kannalta käyttökelpoisimpia kaasu/paine yhdistelmiä voisi olla ilma 2 barin paineessa ja helium 1 tai 2 barin paineessa. Näillä yhdistelmillä päästään n. 17 - 40 % alhaisempiin roottorin lämpötiloihin, mikä on jo huomattava parannus nykyiseen tilanteeseen. Tällöin saman kokoisesta moottorista voidaan ottaa suurempi teho. Lisäksi paineistuksen oikealla suunnittelulla voitaisiin muotoilla kaulaosaa kapeammaksi. Paineistetun vedyn tai heliumin käsittely ja varastointi on kuitenkin melko hankalaa ja niiden vaatimat laitteistot kalliita ja monimutkaisia. Niinpä varteen otettavaksi vaihtoehdoksi jää vain paineistetun ilman käyttö.

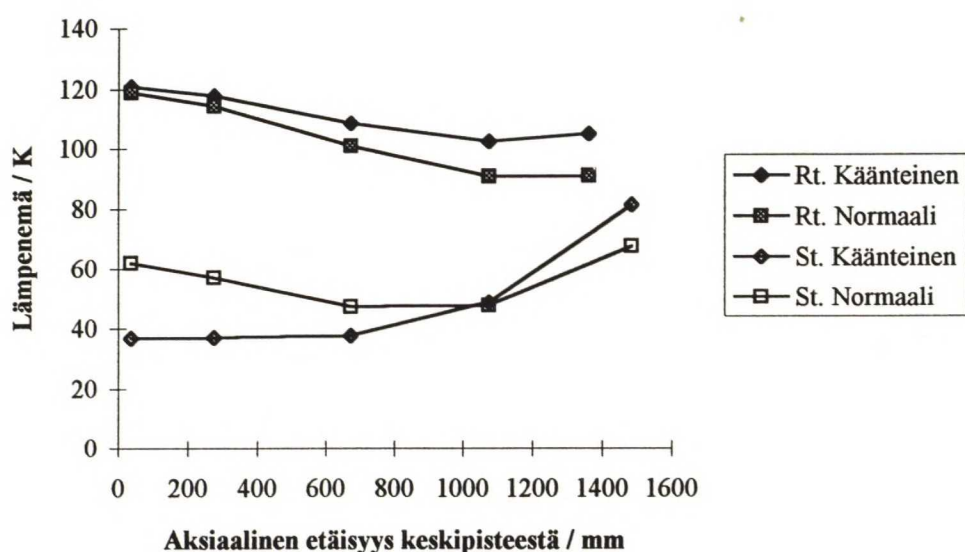
5.4 Viileämmän ilman johtaminen koneen keskiosaan

Suurissa ilmajäähdytteisissä generaattoreissa on käämityksen keskiosan lämpenemiä pyritty alentamaan johtamalla staattorin keskiosan käämityksille viileämpää ilmaa. Tämä on toteutettu käänteisellä ilmankierrolla. Kun normaalilla ilmakierrolla ilma tunkeutuu ilmaväliin kääminpäättilasta, se ehtii lämmitä melko paljon ennen kuin se pääsee jäähdyttämään keskiosan käämitystä ilmasolissa. Käänteisessä ilmankierrossa taas ilma puhalletaan suoraan staattorin ilmasoliin, jolloin staattoria jäähdyttävä ilma on selvästi alhaisemmassa lämpötilassa ja jäähdytys tehokkaampaa. Tämän jälkeen ilma poistuu ilmavälin läpi molemmista päädyistä samalla jäähdyttäen roottoria. Käänteisellä kierrolla on saatu erittäin hyviä tuloksia. 1990-luvulle asti suurimmat ilmajäähdytyksellä toteutetut generaattorit olivat noin 70 MW koneita, mutta nykyään pystytään valmistamaan 100 - 230 MW generaattoreita ilmajäähdytyksellä (Cox, 1992).

Lämpenemän kannalta generaattoreilla suurin ongelma on staattorin liiallinen lämpeneminen. Lisäksi roottorin jäähdytykseen käytetään erillistä puhallusta roottorin läpi. Kuitenkin voidaan ajatella käänteisen ilmakierron voivan helpottaa tilannetta myös ruoripotkurimoottorien tapauksessa, koska koneen keskiosaan saatavan ilman lämpötila on alhaisempi. Niinpä käytettävä Fortran-kielinen lämpöverkko-ohjelma muutettiin APLAC -piirisimulaattoriohjelman muotoon käänteisen ilmankierron sekä muiden lämpöverkkoon tehtävien muutosten vaikutuksien tutkimista varten. APLAC on Teknillisen korkeakoulun teoreettisen sähkötekniikan laboratorion ja Nokia Oy:n yhteistyönä kehittämä piirisimulaattoriohjelma. Vaikka ohjelma on suunniteltu pääasiassa sähkö- ja elektroniikkapiirien tutkimiseen ja simulointiin, niin lämpöverkkojen ja virtapiirien analogian vuoksi se sopii erinomaisesti myös lämpöverkkojen ja lämpenemien mallintamiseen. Ohjelma on erittäin helppokäyttöinen. Siinä määritellään vain käytettävät lämpövastukset, virta- eli häviölähteet sekä niiden väliset kytkennät. Lisäksi ilmankierto voidaan mallintaa virtaohjatuilla jännitelähteillä, jolloin jännitelähteen potentiaali eli lämpenemä määräytyy edellisten pisteiden potentiaalien ja ympäriltä tulevan häviölämpövirran mukaan. APLAC- ohjelmalla voidaan mallintaa myös muutostilan lämpenemiä kytkemällä tarvittavat lämpökapasiteetit verkkoon. Kyseistä ohjelmaa käytettiin työn

loppuvaiheessa sen takia, että sitä käytettäessä voidaan helposti tehdä verkkoon ne muutokset, joita halutaan, lisäämällä vain resistanssi- ja solmulistaan tarvittavat resistanssit ja niiden kytkennät. Tällöin ei tarvita ohjelmointikielien tuntemusta, mikä olisi ehoton edellytys, jos samat muutokset tehtäisiin alussa käytetyllä Fortran ohjelmalla.

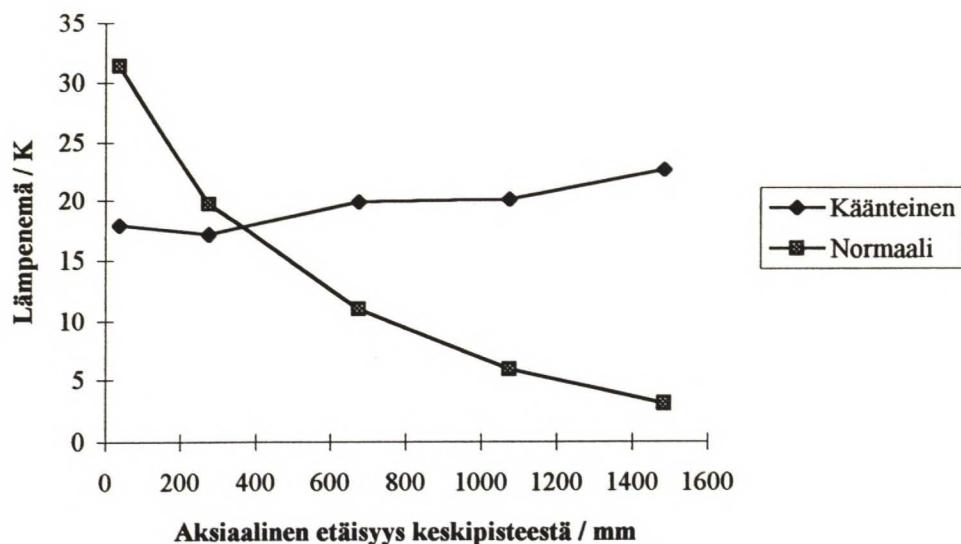
Käänteisen ilmankierron malli ei poikkea normaalista mallista muuten kuin, että ilman kiertosuunta muutetaan. Ilman jakautuminen voidaan olettaa pysyvän samana eli jokaisessa ilmasolassa kulkee sama määrä ilmaa. Täten myös ilman nopeus ja siten konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin α eri kohdissa konetta säilyvät ennallaan. Kuvassa 5.5 on esitetty käänteisen ilmankierron vaikutus roottorikäämityksen ja staattorikäämityksen lämpenemäjakaumiin pitkin koneen akselia.



Kuva 5.05 Roottori- ja staattorikäämityksien kuumimpien kohtien aksiaalinen lämpenemäjakauma käänteisellä ja normaalilla ilmankierrolla.

Kuvasta huomataan, että käänteinen ilmankierto ei auta ruoripotkurimoottorin tapauksessa vaan huonontaa tilannetta roottorikäämityksen kannalta. Roottorikäämityksen maksimi-, minimi- ja keskimääräinen lämpenemä kasvavat käänteisessä ilmankierrossa. Staattoripuolella kääminpäättilassa käämitys lämpenee selvästi enemmän, mutta staattorin levysydämen kohdalla ilmasolien viileän ilman johdosta käämin lämpötilat ovat selvästi alhaisempia kuin normaalilla ilmankierrolla.

Roottoripuolen huonoa lämpenemäjakaumaa selventää hyvin seuraava kuva 5.6, jossa on esitetty ilman lämpenemä ilmavälissä käänteisellä ja normaalilla ilmankierrolla.



Kuva 5.6. Ilmavälin aksiaalinen lämpenemäjakauma käänteisellä ja normaalilla ilmankierrolla.

Vaikka ilmavälin lämpötila käänteisellä ilmakierrolla koneen keskiosassa saadaankin noin 15 K alhaisemmaksi kuin normaalilla puhalluksella, suurimmassa osassa ilmaväliä lämpötila on 10 - 15 K korkeampi. Niinpä keskiosasta päätyihin päin roottorijohtimissa siirtyvän lämpövirran suuruus käänteisellä ilmankierrolla on roottorikäämityksen alaosassa 30 % pienempi kuin nykyisellä järjestelmällä. Kaikki tämä lämpöteho kuumentaa käämitystä ja myös keskiosan lämpötila nousee muutaman asteen.

Koska potkurimoottorin rakenteesta johtuen ei voida olla varmoja siitä, että ilman jakautuminen ilmasoliin pysyy tasaisena, laskettiin käänteisen ilmankierron mallilla lämpenemäarvoja myös muutamalle muulle ilman jakautumiselle. Tutkittavassa koneessa on yhteensä 40 solaa. Laskennat suoritettiin siten, että oletetaan 16 keskimmaisessa solassa kulkevan 50, 65 tai 80 % kokonaisilmamäärästä. Ilman jakautuminen näissä 16 solassa keskenään, samoin kuin lopun ilman jakautuminen loppusoliin, oletetaan tasaiseksi. Seuraavaan taulukkoon 5.3 on kerätty roottorin ja staattorin maksimi-, minimi- ja keskimääräiset lämpenemäarvot kyseisille tapauksille kuten myös tasaiselle jakautumiselle.

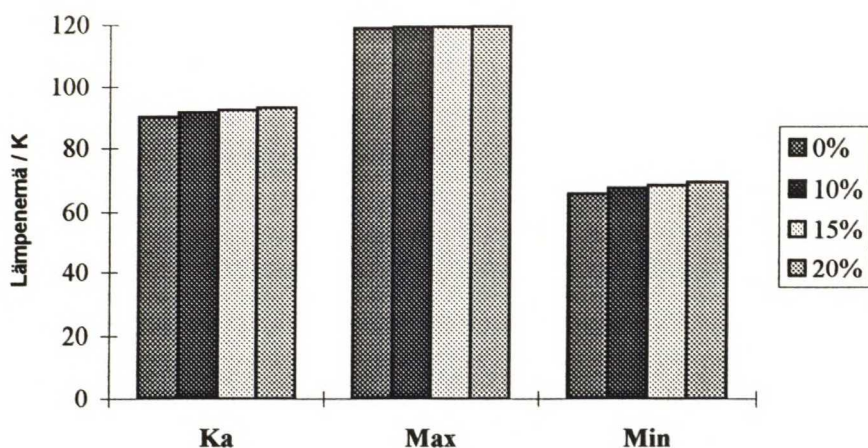
Taulukko 5.3. Roottori- ja staattorikäämityksien lämpenemäarvot ilman erilaisella jakautumisella staattorisoliin käänteisessä ilmankierrossa.

Ilman jakautuminen						
	Tasan			50 % keskisoliin		
	Ka	Max	Min	Ka	Max	Min
St. kupari	49	81	33	49	82	29
Rt. kupari	98	121	80	92	113	76
	65 % keskisoliin			80 % keskisoliin		
	Ka	Max	Min	Ka	Max	Min
St. kupari	52	86	28	60	96	26
Rt. kupari	89	106	75	89	106	77

Vaikka ilman määrää keskimmaisissa solissa lisäämällä, reunasolien kustannuksella, saavutetaan roottorikäämityksessä selvästi parempia tuloksia, ei käänteinen ilmankierto mielestäni ole ruoripotkurimoottoreille sopiva ratkaisu. Syynä on staattorikäämityksen erittäin epätasainen lämpenemäjakauma. Lisäksi staattorin maksimilämpenemä kääminpäässä kasvaa voimakkaasti keskisolien ilmamäärää lisäämällä.

Toinen tapa saada koneen keskiosaan viileämpää ilmaa jäähdyttämään roottorikäämitystä tehokkaammin on tehdä roottoriselkään ilmaputkia. Näihin putkiin voidaan johtaa ilmaa suoraan kääminpäättilasta. Ilma poistuu tasaisesti napaväliin pitkin koneen pituutta roottorin pyöriessä. Tämän muutoksen mallintamisessa oletettiin, että ilma ei lämpene roottoriselän sisällä, vaan sen lämpötila napaväliin tullessa on sama kuin moottorin päätytilan lämpötila. Todellisuudessa ilma ottaa lämpöä vastaan myös näissä putkissa ja sen lämpötila nousee. Täten malli on hieman optimistinen tämän asian suhteen. Toisaalta lämmitessään ilma samalla jäähdyttää roottoriselkää ja sitä kautta myös napavartta ja käämitystä. Käämien ja roottoriselän välillä on kuitenkin niin suuri kokonaislämpöresistanssi, että malli kokonaisuudessaan on hieman optimistinen.

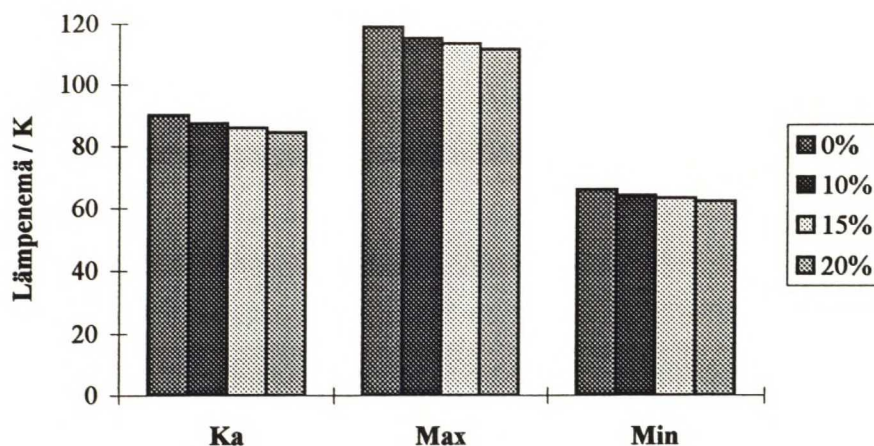
Mallin avulla on laskettu koneen lämpenemät putkiin tunkeutuvan ilman osuuden vaihdellessa 0 - 20 % kokonaisilmamäärästä (kuva 5.7).



Kuva 5.7. Roottorirenkaassa olevien putkien kautta johdettavan ilmamäärän vaikutus roottorikäälämyksen lämpenemään. Kuvan prosenttiluvut ilmoittavat roottoriselässä oleviin ilmaputkiin tunkeutuvan ilmamäärän osuuden koneelle puhallettavasta kokonaisilmamäärästä.

Koska mallissa koneelle puhallettava kokonaisilmamäärä pidetään vakiona, pienenee ilmavälin tilavuusvirtaus koneen päädyssä ja siten myös ilman nopeus ja konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin. Tämän takia konvektiovastus ilmavälin alussa kasvaa ja jäähditys huononee. Niinpä kokonaisuudessaan ilman johtaminen roottoriselän kautta huonontaa tilannetta, vaikka ilman lämpenemä koneen keskiosassa alenee noin 3 - 4 K ja käämin lämpenemä keskiosassa säilyy suunnilleen ennallaan.

Roottoriselän läpi puhallettavalla ilmalla saavutetaan hyviä tuloksia, mikäli se ilmamäärä, mikä johdetaan roottoriputkiin, on normaalin tilavuusvirran lisänä. Silloin 20% lisäys merkitsisi kokonaisilmamäärän nostamista 15:stä 18:aan m^3/s . Tämä lisäys ei ole kovin suuri, mutta se on ristiriidassa kaulan kaventamisyhtymyksen kanssa. Tuloksena saataisiin kuitenkin noin 7 K alhaisempia lämpenemäarvoja (kuva 5.8).



Kuva 5.8. Roottoriselässä olevien putkien kautta johdettavan ilmamäärän vaikutus roottorikäämityksen lämpenemään, kun puhallettavan ilman määrää lisätään siten, että suoraan ilmaväliin menevän ilman määrä pysyy vakiona. Prosenttiluvut ilmoittavat roottoriselässä oleviin ilmaputkiin tunkeutuvan ilmamäärän osuuden koneelle puhallettavasta kokonaisilmamäärästä.

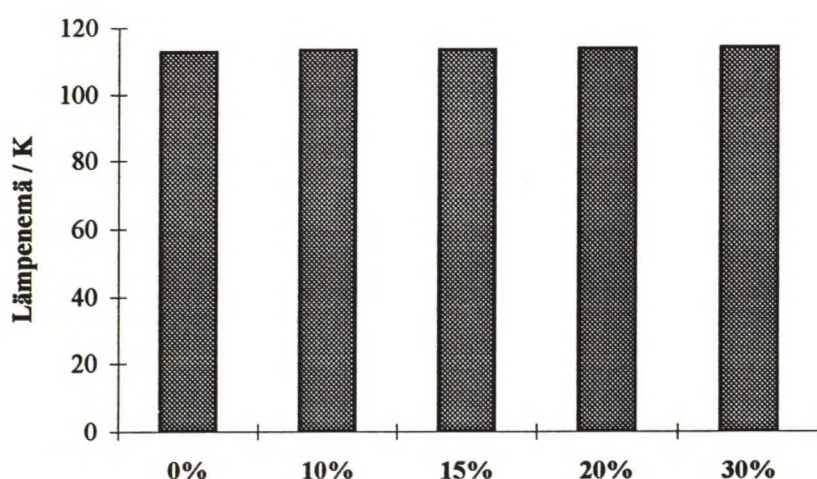
Täytyy kuitenkin muistaa, että vastaaviin tuloksiin päästään myös, jos sama ilmamäärää puhalletaan suoraan ilmaväliin (kuva 5.1).

5.5 Ilman kulkualan pienentäminen ilmavälissä

Staattorin ja roottorin väliin jäävä tyhjä pinta-ala määrää ilman nopeuden ilmavälissä, mikäli puhallettavan ilman määrä pidetään vakiona. Samalla määräytyy myös konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin α , joka on verrannollinen nopeuteen. Murata ym. (1979) tekivät mittauksia, joissa he muuttivat avonapaisen tahtikoneen käämitukien muotoa siten, että ilman virtaus koneen keskellä saatiin suuremmaksi. Kokeiden mukaan 4-napaisen koneen roottorin keskiosan lämpenemiä saatiin alennettua jopa 17 % (82 K:stä 68 K:iin) käämitukien oikealla muotoilulla. Koska staattorin lämpenemät pysyvät tarpeeksi alhaisina, voitaisiin ilmaa pyrkiä ohjaamaan enemmän roottorikäämien väliselle alueelle. Tällöin todelliseen ilmaväliin eli staattorin ja napojen väliin menevää ilmaa pitäisi rajoittaa. Myös napakenkien väliin menevän ilman jäähdytysvaikutus roottorikupariin on heikompi kuin ilmalla, joka saadaan tunkeutumaan käämitysten väliin.

Eräs tapa ehkäistä ilman kulkeutuminen napakenkien väliin voisi olla kyseisen alan täyttäminen jollakin eristysmateriaalilla. Laskentaa varten tehdyssä mallissa on

kokonaispituudesta noin 30 % on yhdistetty toiseen kenkään. Kengän kautta tapahtuva konvektioon perustuva jäähtytys huononee ja mallissa pinta-alaksi on annettu 30 % pienemmät arvot. Koska napakenkien välinen ala on noin 30 % kokonaispinta-alasta, koko ilmamäärään tunkeutuminen ilmapäliin ja napavarsien väliselle alueelle voi osoittautua mahdottomaksi. Siksi laskettiin myös tapaukset, jossa roottoriselän sisällä olevia putkia pitkin johdetaan ilmaa roottorin keskiosiin (kuva 5.9).



Kuva 5.9. Roottorin maksimilämpenemät, kun ilman aksiaalinen kulku napakenkien välissä on estetty. Kuvassa on saadut tulokset, kun roottoriselän kautta on johdettu 0, 10, 15, 20 tai 30 % kokonaisilmamäärästä.

Napavälin täyttämällä saadaan roottorin maksimilämpenemät noin 5 K alhaisemmaksi. Putkissa kulkevalla ilmamäärällä ei juurikaan ole vaikutusta maksimilämpenemään. Roottorin kääminpään lämpenemiä ilman lisäys putkissa kuitenkin nostaa, mikä aiheuttaa myös keskimääräisen lämpenemän kohoamisen.

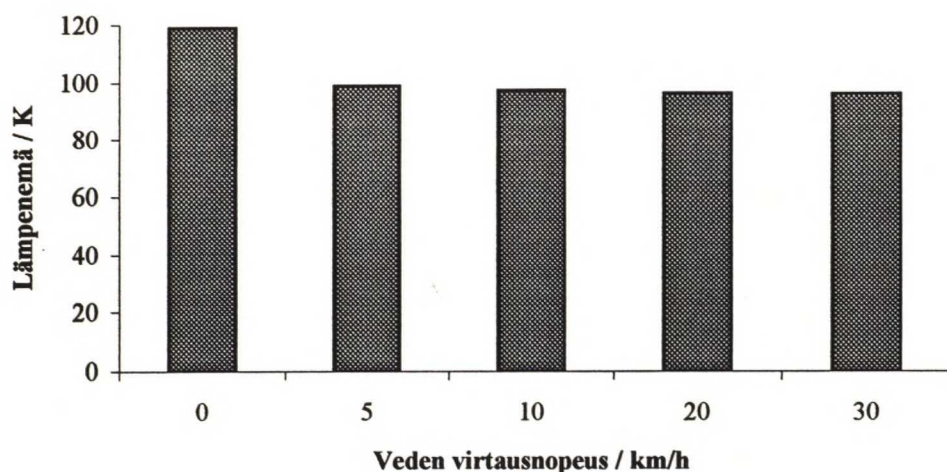
6 MUUT JÄÄHDYTYSRATKAISUT

Moottorin sijoittaminen ahtaaseen, kääntyvään runkoon vesirajan alapuolelle aiheuttaa rajoituksia moottorin normaalin ilmajäähdytyksen tehokkuudelle, kuten edellä on todettu. Ilmajäähdytyksen tehostamisen lisäksi täytyykin etsiä myös muita jäähtymistä edesauttavia ratkaisuja. Toistaiseksi läpikäydyt konvektioon perustuvat ratkaisut eivät moottorin osalta rakenteellisesti poikkea tähän asti valmistuneista Azipod-sovelluksista. Seuraavaksi on käsitelty eräitä mahdollisuuksia alentaa koneen lämpenemiä tekemällä koneeseen lämpenemiä alentavia muutoksia.

6.1 Meriveden käyttö jäähdytyksessä

Azipodin rakenteesta johtuen moottorin runko kokonaisuudessaan on meriveden ympäröimä. Niinpä voisi kuvitella, että koneen jäähtymisessä ei pitäisi olla ongelmia, koska konvektioon perustuva nestejäähdytys on vastaavaa ilmajäähdytystä huomattavasti tehokkaampaa. Laskennallisesti on kuitenkin esitetty, että moottorin rungolla ei ole kovinkaan suurta jäähdyttävää vaikutusta moottorin lämpenemiin (Kolu, 1993). Erot lämpenemissä rungon huomioivassa verkossa ja verkossa, jossa runkoa ei huomioida, ovat vain noin 1 K eli noin 1%. Syynä heikolle lämmön johtumiselle rungon läpi on moottorin ilmajäähdytys. Kun ilma kiertää koneessa se ottaa vastaan käämityksien ja rautaosien luovuttamaa lämpöä. Moottorin rakenteesta johtuen ilman kierrolle on sallittava mahdollisimman esteetön ja tarkoituksenmukainen kulku. Niinpä koneen selän ja rungon välille täytyy jättää ns. kuorisola, jonka kautta staattorin jäähdytyssolista tuleva ilma voi poistua yläpuolella olevaan jäähdytyshuoneeseen. Kuorisolasta johtuen kosketusala staattorin levysydämen ja rungon välillä jää hyvin pieneksi ja lämpöä ei pääse johtumaan suoraan runkoon. Lisäksi roottorin häviölämmölle ei ole muuta poistumistietä kuin ilma. Täten se häviöteho, joka siirtyy rungosta veteen, siirtyy suurelta osin ensin ilmasta runkoon. Lämpötilaero kuorisolan ilman ja ympäröivän veden välillä ei kuitenkaan ole kovin suuri. Koska välissä on kaksi konvektiivista ylimenovastusta ja yksi rungon läpi menevä johtumisvastus, tulee kokonaislämpövastuksesta ilman ja veden välillä niin suuri, että lämpö kulkeutuu helpommin virtaavan ilman mukana jäähdytyshuoneeseen.

Szogyen (1979) mainitsee suurten koneiden jäähdytyksessä käytettävän eräänlaista vesikuorta staattorilevysydämen ja rungon välissä tai onton akselin sisällä kiertävää vettä roottorin jäähdyttämistä varten. Ensin mainittu tapa ei sovellu ruoripotkurimoottorien jäähdyttämiseen, koska roottorin vaatimalle ilmankierrolle täytyy taata ulostulokanava. Tällöin ilmasola staattorin ja rungon välillä on välttämätön. Roottorin lämpötilan pudotukseen voisi olla ratkaisuna ontto akseli ja sen sisällä virtaava vesi. Tällöin osa roottorikäänin virtalämpöhäviöistä ja navan rautahäviöistä johtuu napavartta pitkin akseliin. Veden virratessa akselin sisällä se jäähdyttää akselia ja koko roottorin lämpötila saadaan alhaisemmaksi. Lämpöverkossa tämä asia on mallinnettu siten, että veden on oletettu pysyvän vakio lämpötilassa koko akselin pituudella eli vesimäärä on niin suuri, että se ei ehdi lämmetä. Lämpöverkkoon on lisätty akseliin konvektiovastus ja vakiojännitelähde. Aplac -verkossa jännitelähteellä kuvataan verkon pistettä, jonka lämpötila on aina vakio. Koneelle tulevan ilman lämpötila 40 °C on mallin peruslämpötila ja edustaa lämpenemää 0 K. Kun ympäröivän veden lämpötilana käytetään trooppisten vesien 30 °C:a, saadaan sen lämpenemäarvoksi -10 K, joka on mallin jännitelähteen arvo. Roottorin kuumimman pisteen lämpenemät on laskettu neljällä eri veden virtausnopeudella akselin sisällä (kuva 6.1). Akselissa olevan reiän halkaisija on 150 mm.



Kuva 6.1. Roottorin suurimmat lämpenemät akselin läpi virtaavan veden nopeuksilla 5, 10, 20 ja 30 km/h. Akselissa olevan reiän halkaisija on 150 mm ja meriveden lämpötila 10 K jäähdytysilmaa viileämpi.

Laskelmien mukaan veden virtausnopeuksilla ei tässä mallissa ole kovinkaan suurta merkitystä, mikäli nopeus on vähintään 5 km/h eli 1,4 m/s. Lämpenemän alentuminen roottorissa on sitä suuremmilla nopeuksilla n. 20 - 25 K luokkaa. Malli on hieman optimistinen, sillä napavarren ja roottoriselän välistä ylimenoresistanssia ei ole huomioitu, vaikka todellisuudessa tämä liitoskohta ei lämmönjohtumisen kannalta ole paras mahdollinen. Asiaa voidaan kuitenkin varmaankin huomattavasti nykyisestään parantaa, mikäli ontto akseli otetaan käyttöön. Silloin täytyy kiinnittää huomiota siihen, että lämpö pääsee mahdollisimman hyvin siirtymään napavarresta akseliin. Tätä tarkoitusta varten voidaan liitoskohdassa käyttää jotain lämpöä hyvin johtavaa ainetta, joka täyttää kaikki ilmataskut, jotka muuten jäisivät osien väliin. Onton akselin toteutuksessa voi tulla myös joitain käytännön ongelmia. Merivesi on melko syövyttävää ainetta, minkä takia akselin sisäpinta tulisi päällystää merivettä kestäväällä tavalla. Lisäksi pinnan puhtaus pitäisi pystyä takaamaan, jotta simpukoita ja muita epäpuhtauksia ei tarttuisi akselin pinnalle. Myös tiivistykseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Laivojen moottorien pyörimisnopeudet ovat kuitenkin melko alhaisia, joten tiivistyksestä ei varmaankaan tule suurta ongelmaa.

Edellä esitettyä meriveden käyttöä parempi vaihtoehto on suora nestejäähdytys. Käämityksen johtimista tehdään onttoja putkia, joiden sisällä virtaa jäähdyttävä neste, esimerkiksi vesi. Koska neste on suoraan kosketuksissa häviölähteeseen, voidaan sallia jopa 1,5- kertaisia virrantiheyksiä johtimissa. Tätä jäähdytystapaa on käytetty varsinkin suurissa hitaasti pyörivissä generaattoreissa (Lin ym., 1993). Koska ruoripotkurimoottoreissa ongelmana on roottoripuoli, täytyy nesteen johtaminen roottorijohtimiin tapahtua pyörivän nesteliittimen välityksellä. Myös roottorijohtimien muotoa täytyy vaihtaa. Nykyisiä ohuita lattakuparista tehtyjä johtimia ei voi tehdä ontoiksi. Suurten generaattoreiden jäähdytysjärjestelmän valinta vesi- ja ilmajäähdytyksen kesken tulee tehdä taloudellisten tarkastelujen pohjalta, joissa otetaan huomioon erot valmistuskustannuksissa, käyttökustannuksissa sekä hyötysuhteissa, joka vesijäähdytyksessä on yleensä huonompi (Lin ym., 1993). Samanlaisen tarkastelun voi tehdä myös suurille tahtimoottoreille. Ruoripotkurikäytöissä täytyy ottaa huomioon myös energian säästö, mikä saavutetaan pienemmän virtausvastuksen johdosta, kun samantehoinen moottori voidaan toteuttaa pienempään runkoon.

6.2 Höyrystymislämmön hyväksikäyttö jäähdytyksessä

Nesteen höyrystyminen sitoo erittäin paljon energiaa. Esimerkiksi 1 kW teholla 1 minuutin ajan lämmitettäessä 1 litra eli 1 kg vettä lämpiää 14 K ja samalla teholla samassa ajassa höyrystyy vain 30 g vettä. Vertailun vuoksi mainittakoon, että ilman jäähdytystä 1 kg kuparia lämpiää 1 kW teholla 1 minuutissa 155 K.

Mikäli höyrystyvä neste saadaan hyvään kontaktiin häviölähteen kanssa, voidaan häviölähteen lämpötila pitää melko vakaana nesteen höyrystymislämpötilassa. Gu ym. (1984) käsittelevät artikkelissaan vesivoimalaitoksen generaattoria, jonka staattorikäämityksen jäähdytys on toteutettu höyrystymistä hyväksi käyttäen. Nimellisteholtaan 11,8 MVA:n generaattori on asennettu pystysuoraan. Kun generaattoria käytetään, ontoissa staattorikäämeissä oleva neste alkaa lämmetä ja lopulta höyrystyä. Höyry nousee pystysuoria johtimia pitkin ylös. Koneen ulkopuolelle päästyään se tiivistyy ja valuu paluuputkea pitkin käämin alaosaan uutta kiertoa varten. Generaattorissa on siten suljettu nestekierto, joka painovoiman johdosta pitää itse itsensä kierrossa. Mikäli kone asennetaan vaakatasoon, kierron jatkumisesta täytyisi varmistua pumpuilla. Höyrystymisen käytössä on myös se etu, että häviötehon kasvaessa jäähdytys tehostuu automaattisesti uutta tilaa vastaavaksi. Kun nestettä höyrystyy enemmän, syntyy höyrystymiskohtaan alipaine, mikä lisää nesteen virtausnopeutta. Generaattorilla tehdyn kokeen mukaan käämityksen lämpötila pysyy melko vakaana nesteen höyrystymislämpötilan tuntumassa myös ylikuormitustilanteissa (Gu ym., 1984). Tilanne pysyy hallinnassa niin kauan kuin nestettä riittää kierrossa. Jossain vaiheessa kuormitusta lisättäessä tullaan kuitenkin tilanteeseen, missä nestettä höyrystyy enemmän kuin tilalle virtaa. Tällöin tapahtuu kuivaksi kiehumista ja lämpötila käämityksessä nousee erittäin nopeasti. Gu ym. (1984) mukaan jäähdytyksen suunnittelussa ei olekaan tärkeä asia lämmönsiirto vaan virtauslaskut. Avainkysymys heidän mielestään on putken oikean poikkipinta-alan määrittäminen. Myös oikean nesteen valitseminen halutun lämpötilan mukaan on tärkeää.

Edellä esitetty jäähdytystapa voidaan toteuttaa myös roottorissa, mutta siihen tarvitaan lisävarusteita. Mielestäni höyrystymisjäähdytyksen tämän tapainen käyttäminen ei tule

kysymykseen Azipodin tyyppisissä moottorikäytöissä. On olemmassa kuitenkin eräs toinenkin tapa käyttää höyrystyslämpöä.

6.2.1 Lämpöputket jäähdytyksessä

Heat pipe eli suoraan suomennettuna lämpöputki on laite, jolla voidaan siirtää suuria lämpömääriä melko pitkän matkan päähän pienen lämpögradientin yli (Chi,1976). Lämpöputki on ontto putki, jonka sisäpinnalla on jonkinlainen huokoinen pintarakenne. Tämä sisäpinta on kyllästetty käytettävällä aktiivisella nesteellä. Toinen pää putkesta on höyrystymispää ja toinen jäähdytyspää. Höyrystymispuolella sisäpinnan neste höyrystyy ja kulkeutuu putken sisällä toiseen päähän, missä se tiivistyy jälleen nesteeksi. Tiivistyessään neste imeytyy takaisin pintakerrokseen. Edellä mainittu kierto aiheuttaa huokoisessa sisäpinnassa kapillaarivoiman, jonka vaikutuksesta neste sisäpinnalla virtaa tiivistymispäästä höyrystymispäähän sulkien kierron. Kapillaarivoiman lisäksi määrättyissä putkissa voidaan neste-höyry kiertoa voimistaa painovoiman avulla (pystyt putket) tai keskipakovoimalla (pyörivät putket).

Myös lämpöputkilla on omat rajoituksensa, joita on neljä (Chi,1976): kapillaarinen rajoitus, äänirajoitus, kuljetusrajoitus sekä kiehumisrajoitus. Kapillaarisen rajan asettaa kierron aiheuttaman kapillaarivoiman suuruus. Tätä rajaa voidaan nostaa käyttäessä painovoimaa tai keskipakovoimaa hyväksi. Ääniraja saavutetaan kun höyryn nopeus putken sisällä saavuttaa äänen nopeuden. Mikäli tämän jälkeen jäähdytyspuolella parannetaan jäähtymiskykyä, ainoastaan jäähdyttävän osan lämpötila laskee. Höyrystymispuolelle vaikutukset eivät voi siirtyä, koska höyry kulkee jo äänen nopeudella. Siten jäähtymispuolella saavutettu hyöty näkyy putken sisällä olevan kaasuvirtauksen alku- ja loppupään kasvaneena lämpögradienttina. Sisäpinnan rakenne asettaa omat kuljetusrajoituksensa nesteen virtausnopeudelle. Mikäli saavutetaan kiehumisraja, sisäpinta pääsee höyrystymispuolella kiehumaan kuiviin ja neste-höyry kierto katkeaa.

Lämpö siirtyy lämpöputken eri osissa eri tavalla. Höyrystymispuolella ja tiivistymispuolella lämmön on siirryttävä johtumalla ulkokuoren läpi. Huokoisessa

sisäpinnassa lämpö siirtyy osittain johtumalla ja osittain konvektiivisesti höyrystymällä. Höyryputkessa lämpö kulkeutuu höyryvirran mukana tiivistymispuolelle, missä se tiivistyy. Lämpöputken lämpöresistanssia laskettaessa määräävään asemaan nousevat molemmat johtumisvastukset sekä kontaktiresistanssit molempien päiden ulkopinnalla. Tyypillinen lämpöputken kokonaislämpöresistanssi on 0,002 - 10 K/W. Kun lämpöputken toiminta pysyy edellä mainittujen rajoitusten alapuolella, putken ominaisuudet voidaan mallintaa lämmönsiirtokertoimella kuten muutkin lämmönsiirtymisen tavat (Chi,1976)

$$Q = AU_{HP}(T_{p,e} - T_{p,c}) \quad (6.01)$$

missä Q on lämpövirta

A on jokin ala putkessa

U_{HP} on lämmönsiirtymiskerroin

$T_{p,e}$ on lämpötila höyrystymispuolen pinnalla

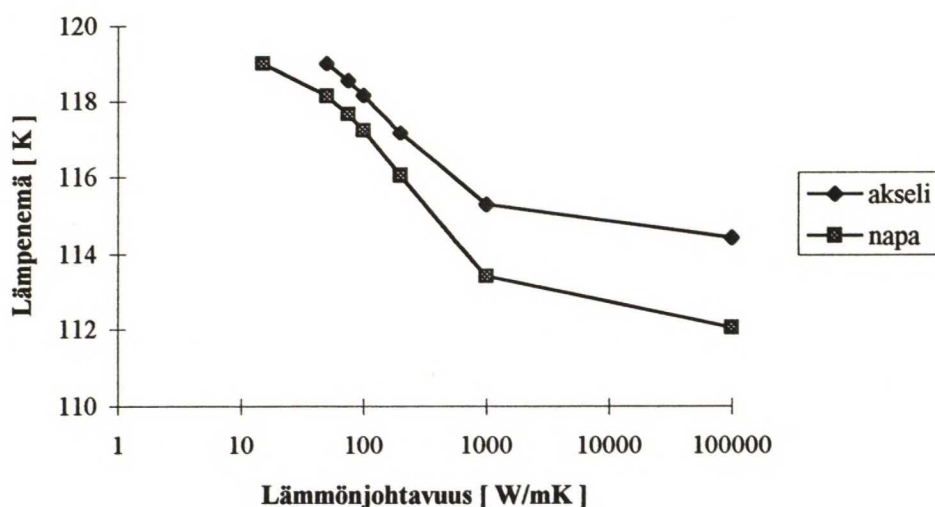
$T_{p,c}$ on lämpötila jäähdytyspuolen pinnalla

Kaavassa (6.01) oleva ala voi olla putken poikkipinta-ala, höyrystymisala tai jäähdytyspinta-ala. Täten myös käytettävä lämmönsiirtymiskerroin vaihtelee käytettävän alan mukaan. Mikäli lämpöputkea ajatellaan vain johtavana kiinteänä aineena, saadaan sille erittäin suuria lämmönjohtavuuksia. Tyypillisesti arvo on 50.000 - 200.000 W/mK (Bradford,1989). Vertailun vuoksi todettakoon, että hyvin lämpöä johtavalla kuparilla vastaava arvo on noin 400 W/mK.

Sähkömoottoreissa voidaan jäähdytykseen käyttää joko pyöriviä tai kiinteitä lämpöputkia jäähdytettävästä kohteesta riippuen (Bradford,1989). Lämpöputki voi olla akselin sisään sijoitettuna tai akseli itsessään voi olla lämpöputki. Akselin sisällä olevalla lämpöputkella on se hyöty, että silloin osa roottorissa syntyvästä lämmöstä voidaan siirtää kokonaan ulos moottorista. Toinen vaihtoehto on pyörivä lämpöputki roottorissa, joka ei ole koneen keskipisteessä. Tällöin putki voidaan sijoittaa lähelle roottorijohtimia ja lämpövastuksen arvo johtimen ja putken välillä saadaan pienemmäksi. Kolmas vaihtoehto on roottoriin radiaalisesti asennettu lämpöputki. Tällöin nestekierto on vaikuttaa kapillaarivoiman lisäksi keskipakovoima sekä

painovoima, joiden suunta vaihtelee roottorin pyöriessä. Pyörivien lämpöputkien suunnittelemisessa suurimpina ongelmina on riittävän jäähdytystehon saaminen jäähdytyspuolelle. Lisäksi, varsinkin akselissa olevassa lämpöputkessa, tulee ongelmaksi valita oikeat nesteet ja metallit, jotta vältetään korroosio-ongelmilta putken sisällä (Bradford,1989). Staattoripuolella voidaan käyttää kiinteitä lämpöputkia monella tavalla. Lämpöputki voi siirtää lämpöä paketista ulos, käämistä ulos tai kääminpäätistä ulkoilmaan. Mikäli lämpöputki on kokonaisuudessaan roottorin tai staattorin sisällä, se vain pyrkii tasoittamaan lämpötilaeroja. Tällöin sitä voidaan käyttää myös isotermisenä energiavarastona lyhytaikaisissa ylikuormitustilanteissa (Bradford,1989).

Käytettävällä lämpöverkolla on tutkittu lämpöputkien käyttöä roottorin sisällä lämpötilaerojen tasoittamiseen antamalla raudan aksiaaliselle johtavuudelle eri arvoja välillä 15 ja 100 000 W/mK. Tulokset on laskettu sekä akselin että napavarren johtavuuksien muutoksille (kuva 6.2).



Kuva 6.2. Akselin ja napavarren aksiaalisen lämmönjohtavuuden vaikutus roottorin maksimilämpenemään (x-akselin asteikko logaritminen).

Laskelmien perusteella voidaan todeta, että pelkkä aksiaalinen lämmön tasoittaminen ei suuresti alenna roottorin lämpenemiä. Niinpä täytyy tarkastella lämpöputkien käyttöä lämmön poistamiseen koneesta.

Seuraavaksi lämpöputki on mallinnettu akselin sisälle siten, että sen toinen pää on potkurin sisällä, joka toimii jäähdyttävänä pintana. Lämpöputken lämmönjohtavuudelle on annettu arvoksi 50 000, 100 000, 150 000 ja 200 000 W/mK. Potkurin puolen lämpenemänä pidettiin sama -10 K kuin ontton akselin tapauksessakin. Taulukossa 6.1 on esitetty roottorin suurimmat lämpenemäarvot kyseisillä lämmönjohtavuuden arvoilla.

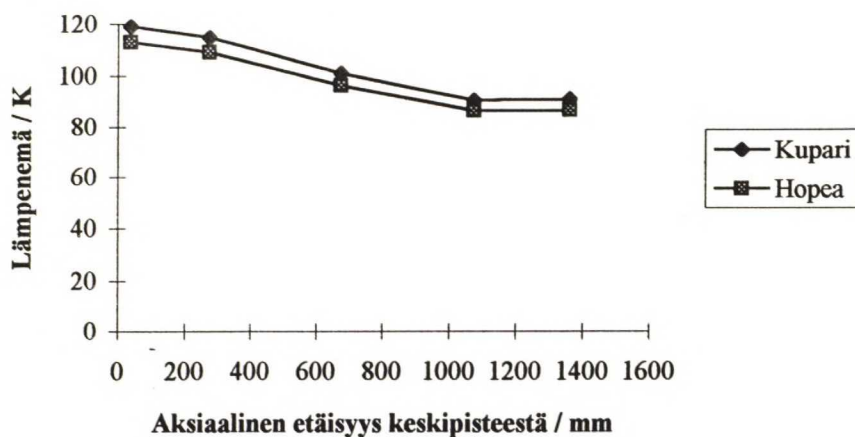
Taulukko 6.1. Roottorin maksimilämpenemä lämpöputken lämmönjohtavuuden eri arvoilla

	λ [W/mK]			
	50.000	10.0000	150.000	200.000
Rt. kupari max [K]	104	99	97	95

Kuten taulukosta nähdään, lämpöputken käyttö lämmön poistamiseen on selvästi tehokkaampaa kuin lämmön tasoittaminen. Toisaalta ero lämpöputken käytöllä akselissa ja veden läpivirtauksella ei parhaassakaan tapauksessa ole kovin suuri, kuten vertailu kuvan 6.1 kanssa osoittaa. Niinpä taloudellisesti ajatellen pelkkä ontto akseli, jonka läpi merivesi virtaa, antaa saman hyödyn alhaisemmilla kustannuksilla. Jos lämpöputkia halutaan käyttää, ne täytyy asentaa mahdollisimman lähelle käämityksiä. Mieluiten käämityksen sisään.

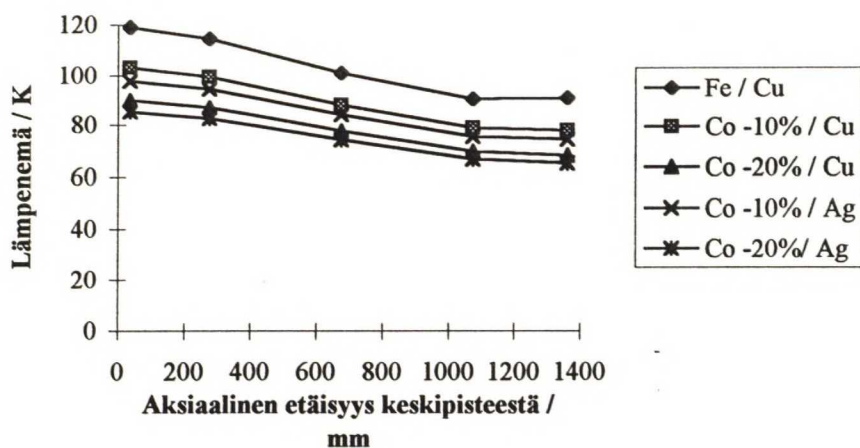
6.3 Materiaalien valinta

Paras tapa alentaa koneen lämpenemää on pienentää häviöitä. Tässä työssä ei kuitenkaan pääsääntöisesti keskitytä häviöiden alentamiseen, vaan päähuomio on ollut parhaiden mahdollisten jäähdytystapojen löytäminen kyseiseen moottorikäyttöön. Poikkeuksena on kuitenkin tutkittu mahdollisuutta käyttää roottorin käämityksissä ja napavarsissa jotain muuta materiaalia kuin kuparia ja normaalia rautalevyä. Roottorikäänin raaka-aineeksi on laskennassa valittu hopea, jonka sähkönjohtavuus on n. 5% parempi kuin kuparilla 100 °C lämpötilassa (MAOL, 1980). Täten hopealla toteutetuilla käämeillä virtalämpöhäviöt ovat n. 5% alhaisemmat kuin kuparilla. Myös lämmönjohtavuus on hopealla kuparia parempi. Hopean käytöllä saavutetaan n. 6 K lämpenemän aleneminen roottorijohtimen maksimilämpenemän pudotessa 119 K:stä 113 K:iin (kuva 6.3).



Kuva 6.3. Lämpenemäjakauma roottorikäänin alaosassa käytettäessä roottorijohtimena hopeaa tai kuparia.

Toinen tapa alentaa roottorikäänin resistiivisiä häviöitä on suurentaa roottorijohtimien pinta-alaa. Koska napavälit ovat suuresta napaluvusta johtuen hyvin pieniä, ainoa mahdollisuus lisätä johtimien pinta-alaa on kaventaa napavarsia. Napavarsien kavennus aiheuttaa kuitenkin suuremman magneettivuon tiheyden. Tavallisilla sähkömoottoreissa käytettävillä rautalevyillä voidaan sallia n. 1,7 - 1,9 T vuontiheyksiä kyllästysvuontiheyden ollessa n. 2 - 2,1 T. Kun napavarret valmistetaan levystä, jossa on 30 - 50% kobolttia, voidaan napavarsien vuontiheys nostaa jopa 2,2 T:aan. Levy, joka sisältää 27% kobolttia kyllästyy vasta 2,36 T (Carpenter Technology, 1995). Vuontiheyden nostaminen ei aiheuta lisähäviöitä, koska magnetointikämeissä kulkee tasavirta. Niinpä napavarsia voidaan kaventaa 10 - 20 % ja lisätä roottorikäänien leveyttä saman verran kuin vartta kavennetaan. Tällöin roottorin virtalämpöhäviöt alenevat 15 - 25%. Jos samalla muutetaan sekä napavarren että roottorikäänin materiaali, päästään jo erittäin alhaisiin lämpenemiin. Kuvassa 6.4 on esitetty roottorin lämpenemäjakautumat viidelle eri napavarsi/käämi -yhdistelmälle käämin ollessa kupari tai hopea ja napavarren nykyinen rautalevy tai 10 tai 20 % kapeampi kobolttipitoinen levy.



Kuva 6.4. Roottorin lämpenemäjakama napavarren ja roottorijohtimien erilaisilla materiaalivalinnoilla. Napavarren materiaalina on joko nykyinen, yleinen sähkölevy (Fe) tai runsaasti kobolttia (Co) sisältävä levy. Roottorijohtimen materiaalina on kupari (Cu) tai hopea (Ag). Prosenttiluku kobolttilevyjen yhteydessä osoittaa kuinka paljon napavartta on samalla kavennettu.

Kuten kuvasta huomataan, jo 10 % kavennus napavarressa pudottaa lämpenemää lähes 20 K, kun roottorijohtimien leveyttä kasvatetaan yhtä paljon kuin vartta kavennetaan. Kun vuontiheyttä vielä kasvatetaan eli napavartta kavennetaan 20 %, saavutetaan jopa yli 30 K alhaisempia lämpenemiä. Napavarren kaventaminen näin paljon voi aiheuttaa kyllästymistä napavarren ja roottoriselän kiinnityskohdassa, koska kiinnityskohtaan tulee lähes yhtä suuria vuontiheyksiä kuin napavarressa on. Kyllästymistä voidaan vähentää tai jopa estää joko tekemällä tai päällystämällä roottoriselkä myös kobolttiraudalla. Myös varmistamalla riittävän suuri kosketuspinta-ala napavarren ja roottoriselän välillä estetään selän haitallinen kyllästyminen.

Staattorikäymissä edellä esitetyt materiaalien vaihdot näkyvät parhaimmillaan noin 5 K alhaisempina lämpötiloina koneen keskiosassa. Vyyhdenpään lämpenemät pysyvät kaikissa eri tapauksissa melko muuttumattomina eron ollessa vain 1-2 K.

7 TULOSTEN TARKASTELU

Kappaleissa 5 ja 6 on esitetty lämpöverkon avulla laskettuja lämpenemätuloksia esimerkkikoneelle erilaisia jäähdytysratkaisuja käytettäessä. Saatujen tulosten perusteella voidaan sanoa, että yhtään yksittäistä ongelman ratkaisumahdollisuutta ei tässä työssä löytynyt. Esille nousi kuitenkin muutamia käyttökelpoisia ideoita, joita yhdistelemällä ja soveltamalla voidaan päästä moottorin ja kaulaosan suunnittelussa toivottuihin tuloksiin. Lisäksi saatiin tarkemmin seulottua asioita, jotka todella vaikuttavat tahtikoneen roottorin lämpenemän alentamiseen.

Nykyisen ilmankierron tehostamisella virtausnopeutta lisäämällä ja ilman kulkua ohjaamalla ei saada tarpeeksi suurta hyötyä toteutettavissa olevilla virtausmäärillä. Nämä seikat ovat kuitenkin erittäin määräävässä asemassa koneen jäähdytystä suunniteltaessa. Koneelle menevän ilman määrä tulee aina olla niin suuri kuin se tapauskohtaisesti on mahdollista. Myös ilman kulku tulee pyrkiä ohjaamaan mahdollisimman tarkoituksenmukaisesti. Ilmavälissä kulkevasta ilmasta suurimman osan pitäisi virrata napojen välissä, jotta saataisiin toivottu tulos aikaan. Avonapaisia tahtikoneita käytettäessä ilma täytyy puhaltaa symmetrisesti molemmista koneen päistä ilmaväliin. Epätahtikonesovelluksissa, joissa ongelmana on ennemminkin staattoripuolen käämityksen lämpenemä, voidaan tapauskohtaisesti tutkia käänteisen ilmankierron vaikutusta. Roottorirenkaassa olevien putkien avulla koneen keskiosaan johdettavalla viileämmällä ilmalla saavutetaan hyötyä vain, jos kokonaisilmamäärää pystytään samalla lisäämään. Putket ovat käyttökelpoisia myös silloin, kun ilman kulkua pyritään ohjaamaan napakenkien välistä alaa rajoittamalla. Tällöin putkien avulla voidaan taata riittävä kulkuala puhallettavalle ilmamäärälle.

Koneen jäähdytyskaasun vaihtamisella heliumiin tai vetyyn päästäisiin riittävän alhaisiin lämpötiloihin ja koneen mittoja voitaisiin pienentää. Kyseessä olevat kaasut ovat kuitenkin erittäin hankalia käsitellä. Lisäksi tarvittaisiin erittäin paljon lisää laitteita jäähdytyksen toteutukseen. Tämän takia kaasun vaihto ei varmaankaan tule olemaan taloudellisesti kannattava vaihtoehto. Kaasun vaihdolle on kuitenkin olemassa vaihtoehto. Ilman paineen nostamisella 1 barista 2 bariin saavutetaan suunnilleen sama tulos kuin käytettäessä heliumia normaalipaineessa. Moottoritilan ja

kaulaosan ilman paineistus ei vaadi kovin suuria investointeja. Koska potkurimoottorien pyörimisnopeudet pysyvät alhaisina, ei kitkan aiheuttamat hankaushäviötkään nouse kovin suureksi häviölähteeksi. Lisäksi paineistuksen avulla voidaan pienentää moottorin kaulaosaa, mikäli kaikkea saavutettavaa hyötyä ei haluta käyttää moottorin koon pienentämiseen. Paineistuksen etuna on myös se, että se voidaan toteuttaa aikaisemminkin valmistuneisiin yksiköihin jälkikäteen.

Lämpöputkien käytöllä koneen akselissa tai napavarsissa ei saada ratkaisevan suuria lämpenemän pudotuksia. Suurin piirtein samat lukemat saadaan pelkästään sillä, että akseli porataan ontoksi ja meriveden sallitaan virrata sen läpi. Tällöin ongelmaksi nousevat lähinnä korroosion estäminen ja tiivistys. Lämmönjohtumisen kannalta ongelmana on lisäksi tarpeeksi alhaisen ylimenoresistanssin aikaan saaminen napavarren ja akselin välille.

Kun napavarren materiaaliksi valitaan toisenlainen sähkölevy, jolle voidaan sallia suurempia vuontiheyksiä, voidaan napavarren leveyttä pienentää. Mikäli näin saatu lisätila napojen välissä käytetään roottorijohtimien leventämiseen, saadaan roottorin virtalämpöhäviöitä alennettua merkittävästi. Samalla päästään jopa 20 % alhaisempiin lämpenemiin.

Edellä esitetyn tarkastelun yhteenvetona voidaan todeta, että selvää hyötyä saadaan, kun jäädytyksessä käytetään ilman paineistusta ja onton akselin läpi virtaavaa vettä. Näiden lisäksi tarkempaa tarkastelua vaatisi höyrystymisjäädytyksen käyttömahdollisuus roottorijohtimien sisällä. Suurin huomio jatkossa tulee kuitenkin suunnata häviöiden pienentämiseen varsinkin roottoripuolella. Näiden seikkojen tarkempien tutkimusten yhteydessä tulee myös tehdä jonkinlaisia pienoismalleja tutkittavista moottoreista, jotta tehtyjen oletusten ja mallien tarkkuus voidaan tarkistaa.

8 YHTEENVETO

Tässä työssä on tutkittu erilaisten jäähdytystapojen vaikutusta sähköisen ruoripotkurimoottorin lämpenemiin. Työn tarkoituksena on ollut tehdä karkea tarkastelu käytettävissä olevilla ratkaisuilla saatavista eduista ja niiden soveltuvuudesta ruoripotkurimoottorin jäähdytykseen. Työssä tehdyt laskennat on jaettu kahteen osaan: konvektioon perustuviin ratkaisuihin sekä muihin jäähdytysratkaisuihin.

Tarkastelujen esimerkkikoneena on käytännön syistä ollut avonapainen tahtimoottori, mutta työn tuloksia voi soveltaa myös muille konetyypeille ottamalla huomioon kunkin konetyypin mahdolliset erityispiirteet ja eroavaisuudet esimerkkikoneeseen. Ulkoisten vaatimusten aiheuttamat koneen mittasuhteet poikkeavat niin paljon vastaavan kokoisista muissa käytöissä olevista moottoreista, että kirjallisuudestakaan ei löytynyt vastaavia ongelmia käsitteleviä lähteitä.

Työssä tehdyt tarkastelut ja laskennat pohjautuvat valmiiseen suurille tahtikoneille tehtyyn lämpöverkko-ohjelmaan. Normaalisti ilmajäähdytyksestä poikkeavat ratkaisut on tutkittu siten, että on mietitty miten kyseinen jäähdytystapa voidaan mallintaa lämpöverkolla. Tämän jälkeen kyseinen yksinkertainen malli on lisätty edellä mainittuun ohjelmaan ja laskettu mallin vaikutus lämpenemiin. Malleja suunniteltaessa on pyritty mielummin optimistiseen kuin pessimistiseen malliin. Mikäli optimistinen malli ei anna tarpeeksi alhaisia tuloksia, ei jäähdytystavan tarkempi tutkiminen ole kannattavaa.

Tämän työn tuloksia tarkasteltaessa täytyy muistaa, että ne ovat vain tietokoneella lämpöverkkojen avulla laskettuja simulointituloksia. Ruoripotkurimoottoreina käytettävät koneet ovat niin suuria, että niitä valmistetaan vain tilauksien mukaan. Niinpä laskettuja tuloksia ei ole voitu verrata mitattujen tulosten kanssa. Lämpenemäarvot on laskettu ainoastaan suuntaa antaviksi, jotta nähtäisiin onko kyseisellä jäähdytystavalla saatavissa mitään hyötyä aikaan.

9 LÄHTEET

Bradford, M. 1989. The application of heat pipes to cooling rotating electrical machines. Fourth International Conference on Electrical Machines (IEE Conf. Publ. no. 310). s. 145 - 149

Carpenter Technology. 1995. Hiperc Alloy 50 HS ja Hiperc Alloy 27. Tuote-esite. s. 39-40

Chi, S.W. 1976. Heat pipe theory and practise. A sourcebook. Washington, USA. Hemisphere publishing corporation. 240 s.

Cox, G.D. 1992. The reverse ventilation of large air cooled generators. International Conference on Electrical Machines, 15-17 September 1992. Manchester, UK. Vol 3. s. 963-967.

Gu, G., Li, Z., Liang, X., Zhang, T. 1984. Evaporative cooling of hydro-generator. International Conference on Electrical Machines. Lausanne, Switzerland. 18-21 September 1984. s. 671 - 674.

Jokinen, T. 1991. Tuotekehitys. Luentomoniste. TKK, Sähkömekaniikan laboratorio. 40 s.

Kolu, E. 1993. Tahtikoneen lämpenemän laskeminen lämpöverkon avulla. Diplomityö TKK, Sähkötekniikan osasto. 76 s.

Kværner Masa-Yards, ABB. 1994. Azimuthing Electric Propulsion Drive Azipod. Myyntiesite. 4 s.

Köfler, H. 1989. Losses in Electrical Machines. TKK, Sähkömekaniikan laboratorio. Raportti nro 26. 111 s.

Lin, X., Gao, J., Yu, G. 1993. A Comparative study of large hydraulic generators with air-cooling and water-cooling. *Electric Machines and Power Systems*. Vol 21. s. 605-613.

MAOL. Taulukot. 3. painos. Helsinki. Otava. 1980. 89 s.

Mellor, P. H., Roberts, D., Turner, D.R. 1991. Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. *IEE Proceedings-b*. Vol. 138, No. 5. s. 205-218.

Motorship. 1993. Propulsion electric drive. Esipainoslehtinen. 4s.

Murata, K., Nonaka, S., Yamamoto, M., Takeda, Y. 1979. Experimental study on cooling of rotor in a salient 4-pole synchronous machine. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. PAS-98, No.1. s. 310-317.

Niemenmaa, A. 1989. Rautahäviöiden synty epätahtikoneessa. Lisensiaatintyö TKK, Sähkötekniikan osasto. 58 s.

Paloniemi, P. 1990. Sähkökoneiden eristykset. Luentomoniste. TKK, Sähkömekaniikan laboratorio. 47 s.

Schuisky, W. Induktionmaschinen. Wien. Springer-Verlag. 1957. 506 s.

Szogyen, J.R.M. 1979. Cooling of electric motors. *Electric Power Applications*. Vol. 2. No. 2. s. 59 - 67.

Wagner, W. Lämmönsiirto. Suom. Ranta, O. Helsinki. Painatuskeskus Oy. 1994. 210 s.

Wiedemann, E., Kellenberg, W. Konstruktion Elektrischer Maschinen. Berlin. Springer-Verlag. 1967. 608 s.